

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
FÖLDTUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

AZ ÁTLAGOS VÁROSI HŐSZIGET
TERÜLETI SZERKEZETÉNEK MODELLEZÉSE
ÉS A MODELL KITERJESZTÉSE

BALÁZS BERNADETT

TÉMAVEZETŐ:

DR. UNGER JÁNOS

TANSZÉKVEZETŐ EGYETEMI DOCENS
SZTE, ÉGHAJLATTANI ÉS TÁJFÖLDRAJZI TANSZÉK

SZEGED

2008

TARTALOM

1. BEVEZETÉS.....	3
2. A VÁROSKLÍMA.....	5
2.1. A városklíma térbeli kiterjedése, kialakulásának okai.....	5
2.2. Az energiaegyenleg változásai természetes és városi területeken	8
2.2.1. A természetes felszínnek energiaegyenlege	8
2.2.2. A városi területek sugárzási mérlege és energiaegyenlege	9
2.3. A hőmérséklet módosulása a városban	13
2.3.1. A városi hősziget általános térbeli és időbeli jellemzői	13
2.3.2. A hősziget erősségére befolyást gyakorló tényezők	17
2.3.3. A hősziget közvetlen hatásai	20
3. A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ VÁROSKLIMATOLÓGIAI KUTATÁSOK RÖVID ÖSSZEFOGLALÁSA	24
3.1. A külföldi kutatások rövid összefoglalása	24
3.2. A magyar kutatások rövid összefoglalása.....	28
4. A VIZSGÁLT TERÜLETEK, ALKALMAZOTT MÓDSZEREK.....	33
4.1. A vizsgált városok földrajzi, éghajlati és szerkezeti adottságai.....	33
4.1.1. Szeged földrajzi, éghajlati és szerkezeti adottságai	35
4.1.2. Debrecen földrajzi, éghajlati és szerkezeti adottságai.....	37
4.1.3. A hajdúsági városok földrajzi, éghajlati és szerkezeti adottságai	40
4.2. A modell függő változójának (ΔT) meghatározása	42
4.3. A modell független változóinak meghatározása	46
4.3.1. Felszínparaméterek.....	46
4.3.1.1. Beépítettség	46
4.3.1.2. A további felszínparaméterek képzése	51
4.3.1.3. A város szélétől mért távolság.....	54
4.3.2. Távolsággal kombinált felszínparaméterek.....	54
4.4. Az éghajlati rendszer matematikai modellezésének módszerei.....	56
4.4.1. Dinamikus modellezés	56
4.4.2. Statisztikai modellezés	56
5. EREDMÉNYEK.....	59
5.1. A városi hősziget és a felszínparaméterek területi eloszlásai	59
5.1.1. A városi hősziget átlagos területi szerkezete korábbi vizsgálatok eredményei alapján	59
5.1.2. A beépítettség területi szerkezete és kapcsolata az átlagos UHI szerkezetével .	61
5.1.3. A felhasznált paraméterek statisztikai vizsgálata összesített adatbázis alapján .	63
5.2. A többváltozós hősziget intenzitás-eloszlási modell felépítése	70

5.3. Validáció.....	73
5.4. Kiterjesztés.....	81
5.4.1. Karcag modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete.....	82
5.4.2. Makó modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete.....	82
5.4.3. Orosháza modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete	83
5.4.4. Hódmezővásárhely modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete	83
5.4.5. Békéscsaba modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete.....	86
5.4.6. Kecskemét modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete	86
5.4.7. Arad modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete	87
5.4.8. Temesvár modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete	89
6. ÖSSZEFOGLALÁS	92
7. SUMMARY	98
IRODALOM.....	104
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	112

1. BEVEZETÉS

Ma a világban több mint 6,6 milliárd ember él és ennek fele városlakó. A Föld városi népessége jóval nagyobb ütemben növekszik, mint az össznépesség, ezért világszerte (így hazánkban is) mind több ember él urbanizált térségben.

Az első városiasnak tekinthető települések körülbelül tízezer évvel ezelőtt jöttek létre. A városok hamar a társadalmak szerveződésének, fejlődésének központjaivá váltak, és már ekkor is – mint ahogy később – a tudományos és technikai fejlődés fő színterei voltak. Mai szemmel is nagyvárosnak tekinthető települések jöttek létre már az ókorban, ilyen volt Babilon (400 ezer fő), Karthagó (600 ezer fő), Théba (800 ezer fő), Bizánc (800 ezer fő) és Róma (1 millió fő). Ekkor a lakosság 10%-a élt a 30 db 100 ezer főnél nagyobb városban (7 millió ember). Ez az időszak tekinthető a városiasodás első csúcspontjának (*Unger és Sümeghy, 2002*). A következő fellendülés már a 10. századhoz köthető, amikor az arab birodalom területén 4,4 millió ember élt 22 nagyvárosban (csak Bagdadban 1 millió fő) (*Chandler and Fox, 1974*). Az európai települések nagyvárosokká fejlődése az ipari forradalom korában (17–18. század) kezdődött, a 20. század első felében pedig az amerikai fejlődés volt szembetűnő. Napjainkban különböző agglomerációk kialakulása figyelhető meg világszerte (*Becsei, 2001*).

A különböző korok urbanizációs szintjét jól példázzák a városi lakosság arányszámai az össznépességhez viszonyítva. Ezek szerint 1800-ban a Föld lakóinak mindössze 2,4%-a, 1900-ban 13,6%-a, 1950-ben 29%-a, 1970-ban 36%-a, 1990-ben 43%-a és végezetül 2005-ben 48,6%-a élt városokban. Ez az előrejelzések szerint tovább növekszik (*UN, 2008*), 2015-ben az 52,7%-ot, 2030-ban az 59,7%-ot, majd 2050-ben a 69,6%-ot éri el (ekkor ez 6,4 milliárd városlakót jelentene a teljes 9,2 milliárd fős populációból). Ma Magyarországon a népesség 67%-a lakik városokban, ez 2050-re 82,7%-ra emelkedhet (az összlakosságot ekkor 8,5 millióra becsülik). Ezen számok és tények figyelembevételével világos, hogy a városok környezetének széleskörű vizsgálata nemcsak természeti és környezeti kérdés, hanem a társadalom és a gazdaság egyéb szférái számára is fontos tényező.

Az urbanizáció erősödésével folyamatosan nőnek a beépített területek, arányuk a sűrűn lakott országokban már a 10%-ot is meghaladja. Az idők folyamán sajátos városszerkezeti típusok alakultak ki. Bizonyos területeken (pl. ókori Rómában, New Yorkban, Buenos Airesben) a geometria szabályai tükröződnek vissza a derékszögű háztömbökben és utcahálózatban, míg ezzel szemben az arab-iszlám és a középkori európai városok felépítését az ötletszerű, szabálytalan szerkezetek jellemzik (*Mézes, 1995*), és csak a 19. században jelentek meg a körutas-sugárutas városformációk (pl. Párizs, Budapest és Szeged).

A mesterséges felszínborítottság a települési környezetben jelentősen befolyásolja a terület energia- és vízegyenlegét, ami közvetve a városok feletti lokális léptékű klímamódosuláshoz vezet. A változások közül a városok hőmérsékleti többlete a legvilágosabban

megnyilvánuló, leginkább észrevehető jelenség. A kialakuló városi hősziget (urban heat island – UHI) elsősorban az erősen urbanizált részek és a külterületek között jelentkező eltérő hűlési és felmelegedési ütem következménye. Nagysága (intenzitása – ΔT) amellett, hogy jellegzetes napi járást mutat, a városon belül meglehetősen eltérő nagyságrendű. A városi hősziget egy pozitív termális módosulás, tehát a város általában melegebb a környezeténél. A jelenség nemzetközi vizsgálata széles körű, ezen belül a hősziget legerősebb kifejlődése az, ami a legnagyobb figyelmet érdemel. A hőmérséklet napi menetén belül a maximális hősziget valós idejű tanulmányozása nem a legkönnyebb feladat, nem kis mértékben amiatt, hogy bekövetkezésének ideje és értéke naponta változik az általános időjárási viszonyok függvényében.

A városi környezet okozta klímamódosulás nemcsak az ott élők komfortérzetét, egészségét (pl. hőstressz, orvosmeteorológiai problémák stb.), és a növények fenológiai fázisát változtatja, hanem gazdasági hatással is van a városlakókra, hiszen – elsősorban a mérsékelt éghajlati övre koncentrálva – télen kevesebb energia elegendő a fűtéshez, nyáron viszont több szükséges a hűtéshez. Tehát ez a jelenség ma a világon egy nagyon aktuális, igen sok embert érintő problémaként jelentkezik. Emiatt a felmérése, tanulmányozása, ezen belül modellezése és előrejelzése, valamint építészeti és városrendezési eljárások kifejlesztése a mérséklésére nagyon fontos feladatcsoportot jelent.

Ehhez kapcsolódóan dolgozatomban célja az, hogy – szegedi és debreceni hőmérsékleti és felszínborítottsági adatok alapján – egy könnyen hozzáférhető és előállítható bemeneti adatokon alapuló többváltozós modellt készítsék az átlagos hősziget területi eloszlásának közelítésére, majd e modellt kiterjesszem más, hasonló éghajlati és földrajzi adottságú városokra, ahol nem állnak rendelkezésre hőmérsékleti mérésadatok. Vizsgálatom egy nagyobb, az SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszékén több éve folyó városklíma-kutatási projekt egyik fejezetét jelenti.

2. A VÁROSKLÍMA

2.1. A városklíma térbeli kiterjedése, kialakulásának okai

A települések környezetükhöz viszonyítva módosítják a felszín anyagát és energiaegyenlegét, illetve a légkör összetételét. Napjainkban az emberiségnek mintegy felét érintik a mesterségesen létrehozott városi környezet terhelései: a környezetszennyezés, a zaj, a felfokozott élettempóval együtt járó stressz és nem utolsósorban a városi légtér – a természetes környezethez képest – megváltozott fizikai paraméterei. A mesterséges tényezők együttesen egy speciális helyi klímát (városklímát) határoznak meg. A települések legnyilvánvalóbb klímamódosító hatása az a hőmérsékleti többlet (*Landsberg*, 1981), amelyet városi hőszigetnek (urban heat island – UHI) nevezünk. A jelenség rövidítéseként az angol UHI-t használjuk, mert a hazai szakirodalomban magyar nyelvű rövidítés egyelőre még nem honosodott meg. A továbbiakban a városi hősziget szempontjából érdekes módosulásokkal, jellemzőikkel és kialakulásának okaival foglalkozok.

A megváltozott városi levegőkörnyezetet csak a különböző léptékű meteorológiai folyamatok eredményeképpen kialakuló éghajlat ismeretében lehet vizsgálni (*Probáld*, 1974). A szabadban megfigyelhető mikroklimák időben igen változékonyak, rövid életűek és jellegzetes kifejlődésük egy adott időjárási helyzethez kötődik. A városokban, főleg a nagyobbakban fellelhető mikroklimákat tarka mozaikszerűség jellemzi. Az utcák, terek, parkok, udvarok mind sajátos éghajlattal rendelkeznek, amelyekben azonban közös vonások is vannak. Ezek a közös tulajdonságok éppen a lokális (helyi) éghajlat, a városklíma keretében jutnak kifejezésre.

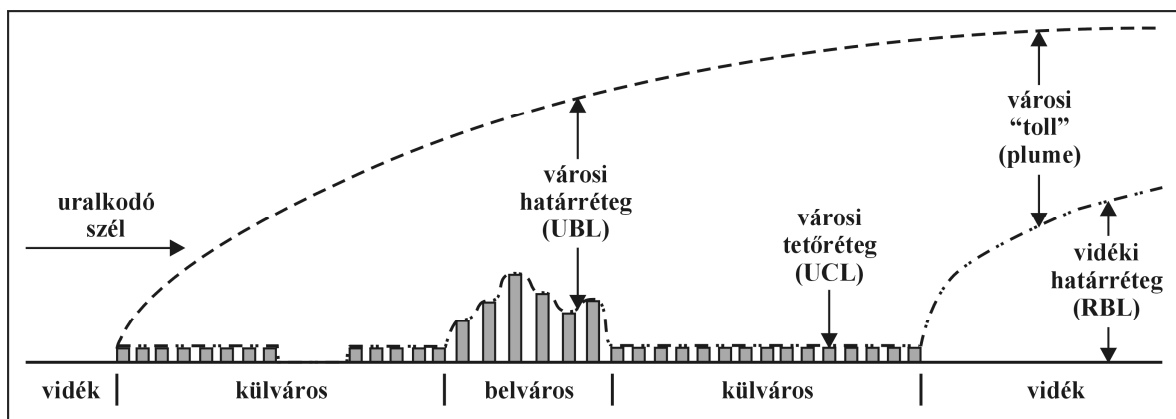
A város földrajzi elhelyezkedése az adott nagyléptékű éghajlati zónában, mérete (lakosság, terület), szerkezete, gazdaságának jellege jelentős hatással van a kialakult éghajlati különbségek mértékére. A természetföldrajzi adottságok (pl. medencefekvés, tengerparti elhelyezkedés) erősíthetik vagy gyengíthetik az antropogén okok hatására bekövetkező változások mértékét. E változások főbb okozói a következők:

- A természetes felszínt épületek és vízátnemeresztő felületek helyettesítik, amelyek vízelvezető csatornarendszerekkel kombinálódnak.
- A városi felszín geometriája rendkívül összetett, a térbeli egyenetlenségek horizontálisan és vertikálisan – az utcák és a parkok felületétől a különböző tetőmagasságokig – is igen változatosak.
- A járdák, utak és az épületek anyagainak fizikai tulajdonságai lényegesen különböznek az eredeti felszín sajátosságaitól. Általában kisebb albedóval, más hővezetési tulajdonsággal és hőkapacitással rendelkeznek.
- A helyi energiaegyenleg lényeges része lehet az emberi tevékenység által (ipar, közlekedés, fűtés) termelt és a környezetbe kibocsátott vagy kikerült hő is.

- A várost leperszerűen vonják be a fűtés, közlekedés és az ipari folyamatok során keletkező idegen anyagok, így a vízgőz, gázok, füst és egyéb szilárd szennyezőanyagok.

A városklíma jellemzőinek megismerése előtt röviden ismertetem a települések felett kialakuló légrétegeket és jellemzőiket:

A városi határréteg (urban boundary layer – UBL) magassága jelentős mértékben függ az érdességi viszonyoktól. A városi határréteg tetőszint alatti és feletti rétegekre különíthető el. A városi határréteg nagyobbik része, amelynek alapja a tetőszint közelében van, lokális vagy mezoskálájú jelenség és jellemzőit az általános városi felszín alakítja ki. A nappali UBL szerkezete és dinamikája hasonló a vidéki határrétegéhez (rural boundary layer – RBL), attól eltekintve, hogy annál némileg turbulensebb, melegebb, szárazabb és szennyezettebb. A városi határréteg burokként veszi körül a települést (2.1.1. ábra), és függőleges kiterjedése meghaladja az RBL magasságát. Enyhe és közepes erősségű szél esetén a városi határréteg egy „toll” (v. „fáklya”) formájában elnyúlik a vidéki (természetes) légköri határréteg felett a széliránynak megfelelően. Így, a városon túl a természetes felszínnek megfelelően kifejlődött RBL felett helyezkedik el a – városi levegő tulajdonságait sokszor több 10 km-re is kiterjedően hordozó – réteg. Az éjszakai UBL gyökeresen más, mint vidéki megfelelője. Zavartalan viszonyok között gyakran 300 m-es magasságig is kiterjed és továbbra is jellemző rá a viszonylag erős keveredés, míg az RBL-ben a kisugárzás hatására erőteljes inverziós rétegzettség alakul ki.



2.1.1. ábra A városi légkör struktúrája (Oke, 1976)

A városi határrétegen belül, az átlagos tetőszint magasságában kialakuló ún. városi tetőréteg (urban canopy layer – UCL) tulajdonságait mikroskálájú (pl. épületekhez, terekhez, parkokhoz kapcsolódó) folyamatok határozzák meg (Oke, 1976).

A hatások számszerűsítve mindig a településen belül és a külterületen észlelt értékeknek a különbségeként értelmezendők. Meglévő város esetén csak az egyidejű városi és környékbeli – egyébként azonos feltételek melletti – mérésekből származó adatokat lehet

felhasználni az összehasonlításra. Az ezzel kapcsolatos alapmodell szerint a mért városi paraméterek (pl. hőmérséklet) M értékei három elem összegzett eredményeként állnak elő (Lowry, 1977):

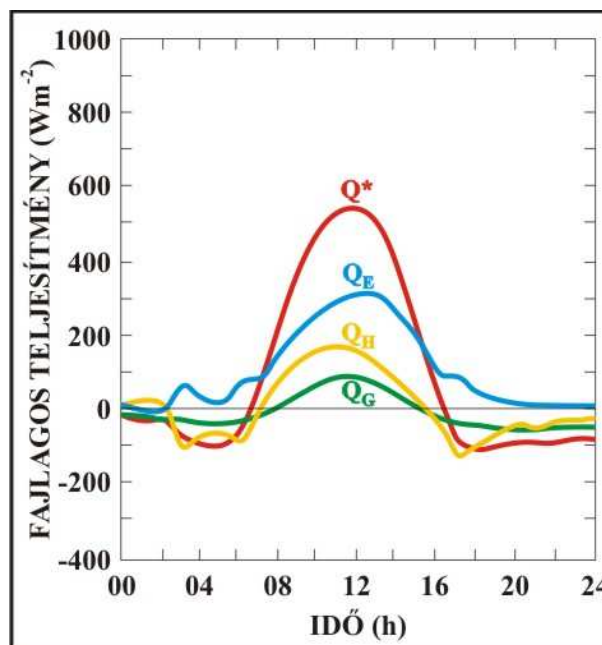
$$M = C + L + U$$

ahol C – a terület háttérklímájának mérési adataiból származik, L – a földrajzi elhelyezkedés (topográfia, vízfelület stb.) sajátosságainak befolyásoló hatásaiból adódik, U – pedig az összetett városi környezet (területhasználat, anyag, geometria, épülettömeg, városon belüli elhelyezkedés stb.) eredőjét jelenti.

2.2. Az energiaegyenleg változásai természetes és városi területeken

2.2.1. A természetes felszínek energiaegyenlege

A felszínre jutó sugárzási energia mennyisége határozza meg a sugárzási mérleg (Q^*) sajátosságait, amelyben nappal a rövidhullámú sugárzás dominál, éjszaka pedig kizárólag csak a hosszúhullámú sugárzási folyamatok játszanak szerepet. A felszín energiatöbbletét (veszteségét) a talaj irányába (irányából) történő hőszállítás (Q_G), valamint a légkör irányába (irányából) történő konvektív szállítású érzékelhető és látens hőszállítás (Q_H+Q_E) vezeti el (pótolja). Adott esetben a tényezők konkrét arányát főleg a felszínborítottság jellege, a talaj termális tulajdonságai és a légkör állapota (főleg a turbulencia szintje) szabályozza. Egy alacsony növényzettel borított felszín egyenlegében (2.2.1. ábra) a nappali sugárzási többlet 80–90%-a a levegőbe jut, de az éjszakai hosszúhullámú sugárzási veszteséget nagyrészt a talajban tárolt hő fedezi és csak kisebb részben (10–50%) a légkör irányából jövő hőszállítás (amelynek az oka az ekkor visszafogottabb mértékű turbulens aktivitás).



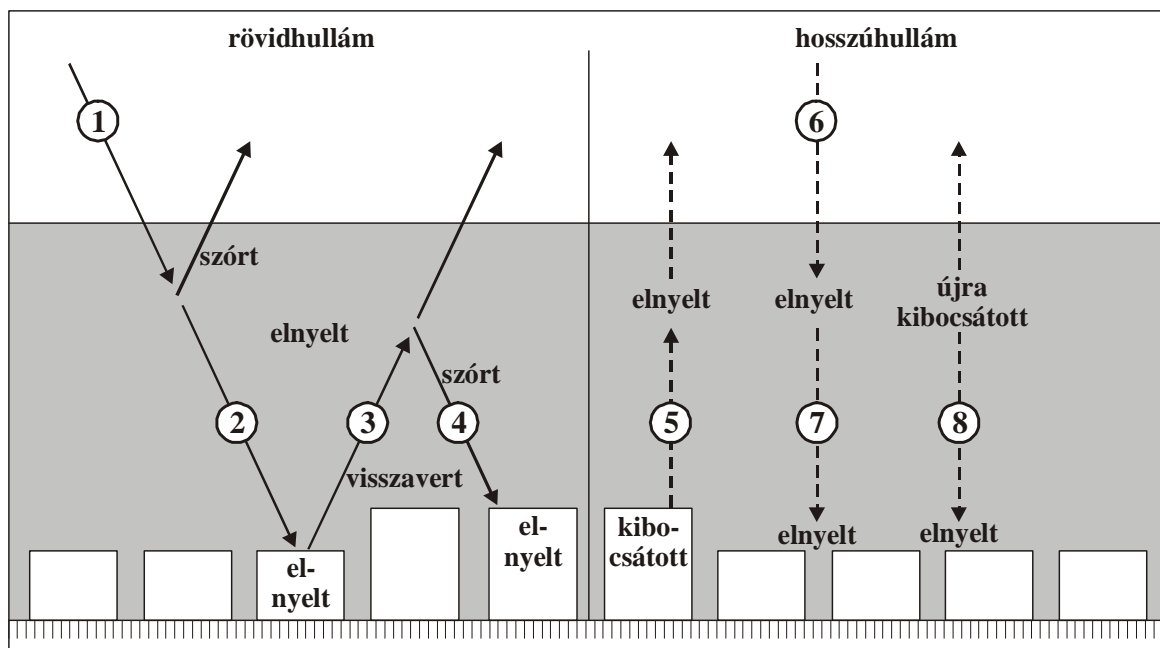
2.2.1. ábra Az energiaegyenleg tényezőinek napi menete egy öntözött füves területen szeptemberben (Hancock, Wisconsin) (Oke, 1982)

A turbulens hőszállításban belül az érzékelhető és látens hő arányának megoszlása nagyrészt a felszín nedvességének mértékétől függ. Ha a felszín nedves, akkor az evapotranspiráció elérheti a maximálisan lehetséges 100%-ot, nagysága csak a rendelkezésre álló energiamennyiségtől függ. Ekkor a látens hő aránya a döntő. A felső réteg nedvességtar-

talmának csökkenésével a sugárzási többlet egyre kisebb része fordítódik párologtatásra és nagyobb része pedig a felette lévő levegő felmelegítésére, vagyis a Q_H szerepe megnő a Q_E rovására (Unger és Sümeghy, 2002).

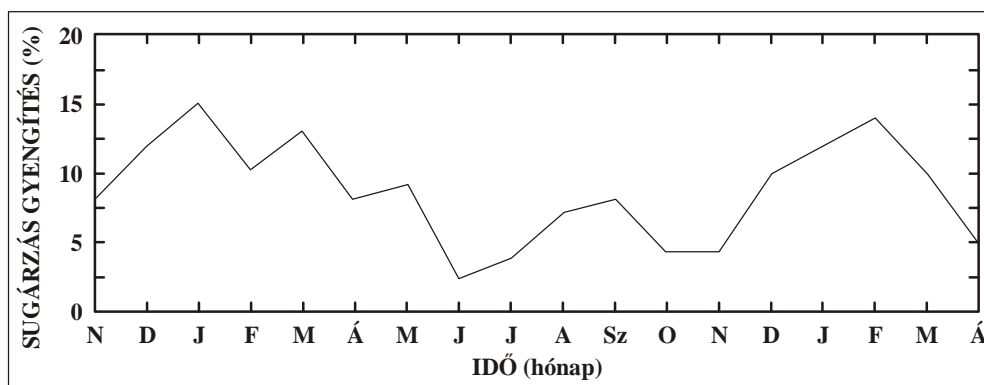
2.2.2. A városi területek sugárzási mérlege és energiaegyenlege

A város a sugárzási mérleg rövid- és hosszúhullámú összetevőire való módosító hatása esetenként jelentős lehet, amelynek okai a levegőben lévő szennyezőanyagok és a felszín megváltozott sugárzási tulajdonságai (2.2.2. ábra).



2.2.2. ábra A rövid- és hosszúhullámú sugárzási folyamatok általánosított szerkezete a szennyezett városi határrétegben (Oke, 1982)

A beérkező (1) és a felszínről visszaverődő (3) rövidhullámú sugárzás a külterületekhez képest erősebben gyengül a szennyezett városi légkörben. A felszín bevétele ($K\downarrow$), amely a direkt és szórt sugárzásból (2), valamint visszavertből (4) áll, általában 2–10%-kal kevesebb a városban (Peterson and Stoffel, 1980). Az intenzívebb feláramlások, a turbulens átkeveredések és a fűtés hiánya miatt nyáron kisebb, télen viszont a magasabb értékek jellemzőek (2.2.3. ábra). A reggeli és délutáni órákban az alacsonyabb napmagasság miatt a sugarak hosszabb utat tesznek meg a szennyezettebb városi levegőben, ezért ekkor nagyobb a sugárzásveszteség, mint délben. Éves szinten tehát a város kevesebb besugárzást kap, mint természetes környezete.



2.2.3. ábra A beérkező rövidhullámú sugárzás gyengítésének menete a légszennyezés következtében (Montreal, 1965. nov. – 1967. ápr.) (Kuttler, 1998)

Megkülönböztethető hullámhossz szerinti veszteség is, amely szerint a rövidebbektől (UV) a hosszabbakig (IR) csökken a veszteség mértéke, tehát a bioklimatológiai szempontból fontos UV sugárzás csökken a legjobban. Azonban a városban az albedó általában 0,05–0,10-del alacsonyabb, mint a közepes szélességek vidéki területein (vagyis kisebb a $K\uparrow$) (Oke, 1974), ami részben az építési anyagok színe és télen a hótakaróval való borítottság mértéke, részben a tagolt felszín (utcák, házak) hatására csapdába eső napsugarak következménye. Így a két hatás eredményeképpen a rövidhullámú sugárzási mérleg (K^*) értékeiben nem mutatkozik túl nagy különbség.

A hosszúhullámú sugárzás esetében is hasonlóan egymást kioltó folyamatok lépnek fel. A szennyezett levegő és a városi felszín valamivel kisebb kibocsátó-képességét a hősziget ellensúlyozza, ugyanis a magasabb hőmérsékletű felszín megnövelt kisugárzást eredményez (5). Ennek jelentős része elnyelődik (6) a szennyezett rétegben és visszasugárzódik a felszínre a bejövő égboltsugárzás egy részével együtt (7), emellett a hősziget feletti meleg levegő is bocsát ki sugárzást (8). Éjszaka ez az egyesített hosszúhullámú bevétel egy kicsit nagyobb a városban, mint a külterületen (Oke and Fuggle, 1972) és esetleg nappal is nagyobb maradhat a napsugárzás által felmelegített szennyezőanyagok miatt. Összességében tehát az urbanizáció hatására megnő mind a hosszúhullámú bevétel ($L\downarrow$), mind a kiadás is ($L\uparrow$), ezért a hosszúhullámú sugárzási mérlegek (L^*) különbsége nem nagy.

A fentiekből az következik, hogy a teljes sugárzási mérlegnek a város és a külterület közötti különbsége nem jelentős, a mérések szerint általában 5%-nál kevesebb (Probáld, 1975).

A teljes UBL viszonylatában a városi felszín és a felette lévő levegő közötti – területileg átlagolt – energia-cserefolyamatokat kell figyelembe venni. Ekkor a város "felszíne" az UCL és az UBL közötti határfelületet jelenti. Az ezen a felületen keresztülhaladónak tekintett energiaáramlás nem más, mint az egyes UCL-egységekről (tetők, fák, gyepek, utak stb.) kiinduló áramlások összegzése egy nagyobb területű, adott beépítettségi típussal jel-

lemzett városrészre. Egy ilyen városrésznyi felszín közepe tájára vonatkozó energiaegyenleg a következőképpen alakul (ha az advektív hatástól el lehet tekinteni):

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S$$

ahol Q^* – a teljes sugárzási mérleg, Q_F – az antropogén hőtermelés, Q_H – az érzékelhető hő, Q_E – a látens hő és ΔQ_S – az energiatárolás változása.

A Q_F tényezőt lehet becsülni, ha a fűtőanyag-felhasználás térbeli és időbeli mennyisége rendelkezésre áll, közvetlenül azonban nem lehet meghatározni a terepi mérések során. Ezért a gyakorlatban megmért energiaegyenlegek ezt a tagot nem tartalmazzák elkülönülten, hatása a többi tényező egyikében-másikában jelentkezik. A mérsékelt égövben nyáron a Q_F tényező tipikus napi átlaga az elővárosi 5 Wm^{-2} -től a belvárosi 50 Wm^{-2} -ig ingadozik. Ezek az értékek a legtöbb esetben a mérési hibahatáron belülre esnek, ezért elhanyagolhatónak tekinthetők (Oke, 1988). Északi fekvésű városok esetében azonban a Q_F szerepe felértékelődik, ezért feltétlenül számításba kell venni. Az antropogén hőtermelés napi menetében kimutatható egy reggeli és egy késő délutáni-kora esti csúcs, évszakosan pedig egy téli (hidegebb éghajlatokon fűtés miatti) vagy egy nyári (melegebb éghajlatokon hűtés miatti) csúcs.

A belvárosi energiaegyenleg tényezőinek nappali menetében két érdekességet lehet megfigyelni. A délután második felében a Q_H csökkenése – bizonyos késéssel – a Q^* csökkenését követi, valamint a Q_H az éjszaka folyamán is pozitív (a légkör felé irányuló) maradhat. Nagy általánosságban megállapítható az is, hogy a látens hő szerepe a vidéki területekhez képest csökken. Másrészről a Q_E nagysága távolról sem elhanyagolható (2.2.1. táblázat). A táblázatból az is kitűnik, hogy a város hőtárolásának változása (ΔQ_S) általában jelentősen nagyobb, mint a külterületé, amely néhány építési anyagnak a természetes felszínhez képest valamelyest nagyobb hővezető képességével és nagyobb hőkapacitásával magyarázható. Ennek a jelentősége hangsúlyosabb az éjszaka folyamán, amikor a tárolási tényezőnek a városban és a külterületen is nagyobb szerepe van a teljes energiaegyenlegben, és ez a tényező fontossá válhat a magasabb városi hőmérséklet fenntartásában. A hőtárolás különbsége azonban csak kisebb részben tulajdonítható az előzőeknek, feltehetően jelentősebb a felszínnek geometriájában lévő eltéréseknek a szerepe.

2.2.1. táblázat Az energiaegyenleg összetevőinek tipikus arányai az átlagos napi sugárzási mérleghez viszonyítva a külterületen, az elővárosban és a belvárosban (Oke, 1982)

Beépítettség típusa	$\Delta Q_S/Q^*$	Q_H/Q^*	Q_E/Q^*
külterület	0,15	0,28	0,57
előváros	0,22	0,39	0,39
belváros	0,27	0,44	0,29

Az előzők szerint a külterületi és városi felszínek meglehetősen eltérő energiaháztartással jellemezhetők. Ennek oka nagyrészt a rendelkezésre álló nedvesség különbségeiben keresendő. Ha mindkettő nedves, akkor az eltérések kicsik, azonban egy száraz időszak alatt a város egyre inkább az érzékelhető hő egy viszonylagosan nagy helyi forrásává válhat (noha a városi területek öntözése mérsékelheti, vagy akár meg is fordíthatja ezt a tendenciát). Az energiaegyenlegben az érzékelhető és látens hő szerepét szemléletesen fejezi ki a Bowen-arány ($\beta = Q_H/Q_E$). A hányadosnak kimutatható napi változása van, de a külterülettel ellentétben, a városban egész nap pozitív és értéke több órán keresztül nagyobb 1-nél. A külterületen éjszaka negatív is lehet, mivel gyakran Q_H szállítás a légkörből a felszín felé irányul, míg a csekély mértékű párolgás révén a Q_E éjszaka is a légkör felé irányulhat.

2.3. A hőmérséklet módosulása a városban

2.3.1. A városi hősziget általános térbeli és időbeli jellemzői

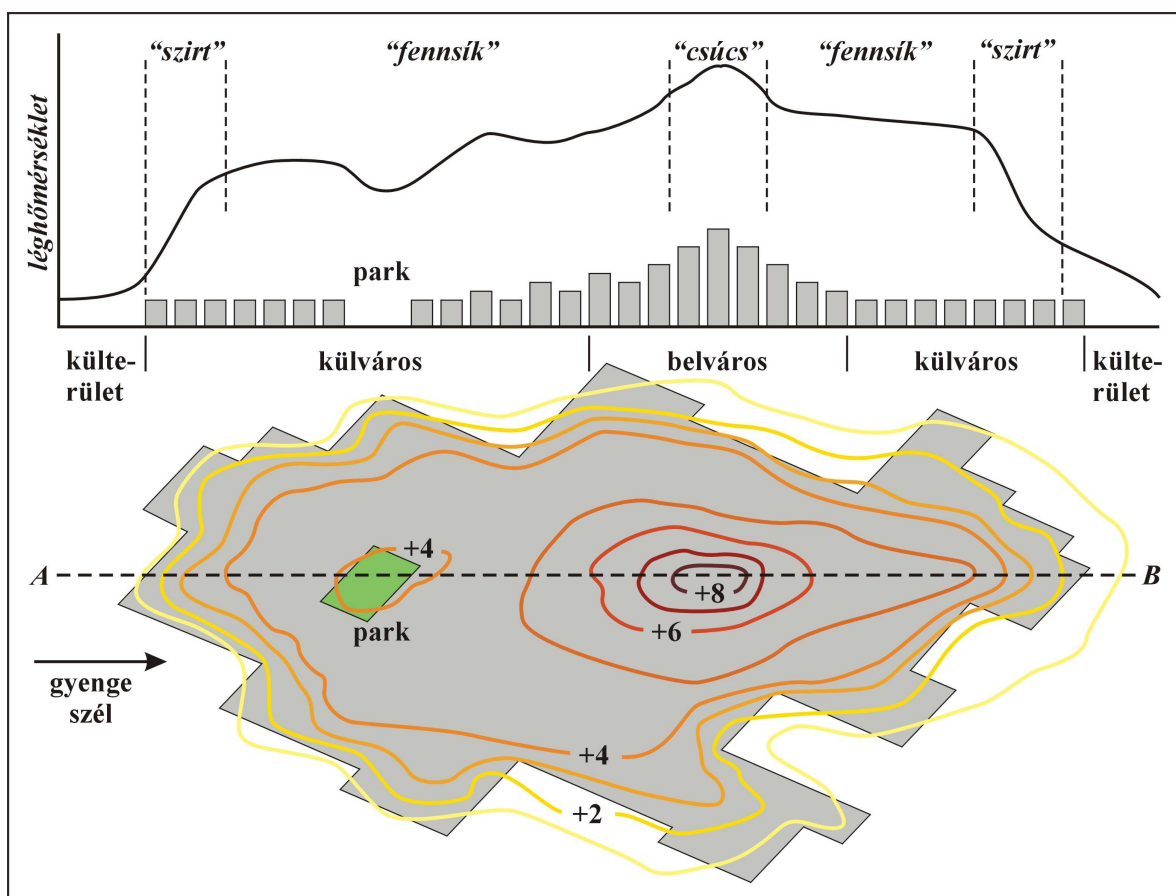
A módosult városi környezet és a természetes felszínek eltérő energiaegyenlegének eredményeképpen általában hőmérsékleti többlet (városi hősziget) alakul ki a város légterében, ill. a felszínén, valamint az alatta lévő rétegekben is néhány méteres mélységig. Ezek természetesen összefüggenek, de keletkezésük folyamataiban és időbeli dinamikájukban lényeges eltérések vannak. A dolgozat csak a városi légterben kialakuló hőmérsékleti többlettel foglalkozik – amelyen belül a rétegzettségének megfelelően két típus (UCL és UBL) különböztethető meg –, s közülük is elsősorban a közvetlen levegőkörnyezetünkben (az UCL-ben) kifejlődött hőszigettel. Számos amerikai és európai településen végzett vizsgálat (Oke, 1973) esetében télen vagy kora ősszel mutatható ki a legnagyobb pozitív eltérés a város javára, máshol ez a hőmérsékleti többlet alig változik az évszakokkal. A 2.3.1. táblázat összefoglalja azokat a tényezőket és folyamatokat, amelyek e hőmérsékleti többlethez vezetnek az UCL-ben.

2.3.1. táblázat A városi hősziget kialakulásának okai és következményei (nem fontossági sorrendben) a külterülethez viszonyítva az UCL-ben (Oke, 1982)

<i>Változás az energiaegyenlegben</i>	<i>A változást okozó városi hatótényező és következménye</i>
megnövekszik a rövidhullámú sugárzás elnyelése	utcák geometriája – megnövekedett felszín és többszörös visszaverődés
megnövekszik a hosszúhullámú sugárzás az égbolt felől	légszennyezés – nagyobb elnyelés és visszasugárzás
csökken a hosszúhullámú sugárzási veszteség	utcák geometriája – növekszik a horizontkorlátozás, csökken az égboltláthatóság
antropogén hőforrások	hővesztesség az épületekből és a közlekedés révén
megnövekszik az érzékelhető hőtárolás	építési anyagok – nagyobb termális vezetőképesség
csökken az evapotranspiráció	építési anyagok – nagyobb „vízátnemeresztés” (beépítettség)
csökken a turbulens hőszállítás	utcák geometriája – kisebb szélesebbesség

A városi hősziget területi szerkezetét, tehát horizontálisan legjellemzőbb vonásait a 2.3.1. ábra mutatja be Oke (1982) nyomán, amely igen jól érzékelteti, hogy mennyire találó a „sziget” elnevezés. Az izotermák egy „sziget” alakját rajzolják ki, amelyet az annál

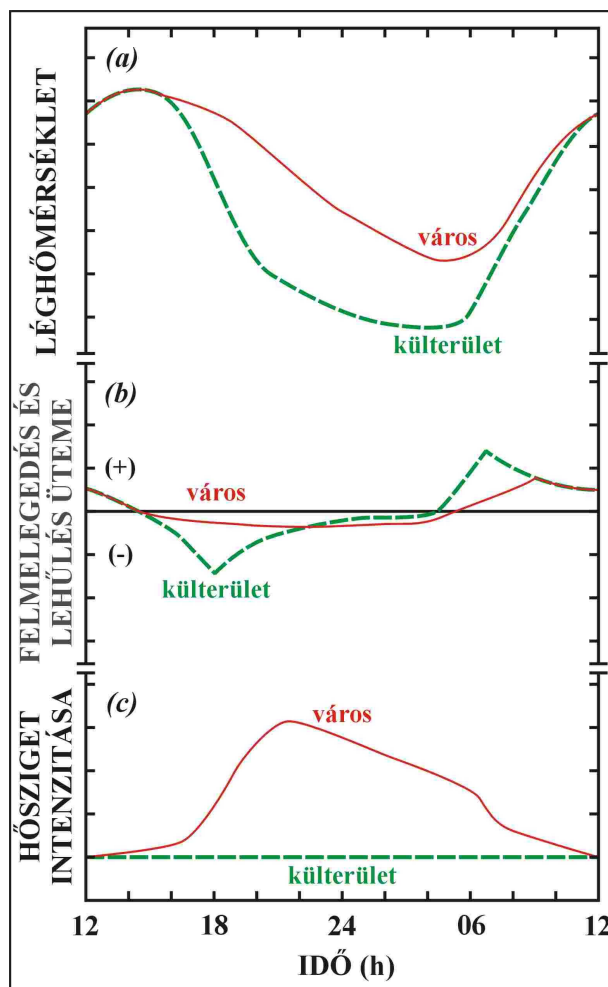
hűvösebb vidéki környezet „tengere” vesz körül. A külterületek felől a belváros felé haladva a külváros peremvidékén erőteljesen megemelkedik a hőmérséklet („szirt”). Ezt követően lassú, de viszonylag egyenletes az emelkedés („fennsík”), amelyet csak a közbeékelődő természetes területek (parkok, tavak) eltérő energiaegyenlege módosít valamennyire. A sűrűn beépített városközpontban észlelhető a legmagasabb hőmérséklet („csúcs”). A gyenge szél hatására az izotermák kissé eltolódnak a légáramlás irányának megfelelően. Ilyen viszonylag szabályos alakzat csak olyan időjárási helyzetekben jön létre, amely kedvező a kisebb léptékű klimatikus folyamatok kialakulásához, ezért általában csak rövid ideig áll fenn és változik is az idő múltával. A hősziget intenzitása (ΔT) a városi és külterületek felszíne felett mért hőmérsékletek különbségével definiálható.



2.3.1. ábra A városi hőmérsékleti többlet vázlatos horizontális szerkezete ideális időjárási körülmények között és keresztmetszeti képe (AB mentén) (Oke, 1982)

A horizontális kiterjedés mellett a hőszigetnek van egy vertikális, a városi felszín fölé nyúló (UBL) része is. Dolgozatomban ezzel nem kívánok részletesen foglalkozni, csupán a teljesebb kép kedvéért említem meg, hogy a hőmérsékleti különbségekben kimutatható egy magassági függés, amely szerint a legnagyobb különbségek a város és a külterület között a felszín közelében jelentkeznek, majd a különbség a magassággal csökken. Általában a hő-

sziget jelenség néhányszor 10 m-től 2–300 m magasságig terjed ki. Jó kisugárzási feltételekkel rendelkező éjszakákon a város felett egy ideig szinte nem, vagy csak alig változik a hőmérséklet, míg a környező területeken erőteljes talajmenti sugárzási inverzió fejlődik ki. Ennek következtében egy viszonylag vékony felszínközeli réteget elhagyva a levegő már melegebb a vidéki, mint a városi terület felett, így a felszíni és a feljebb lévő légrétegre jellemző hősziget ellenkező előjelűvé válik és kialakul az ún. cross-over jelenség (Duckworth and Sandberg, 1954).

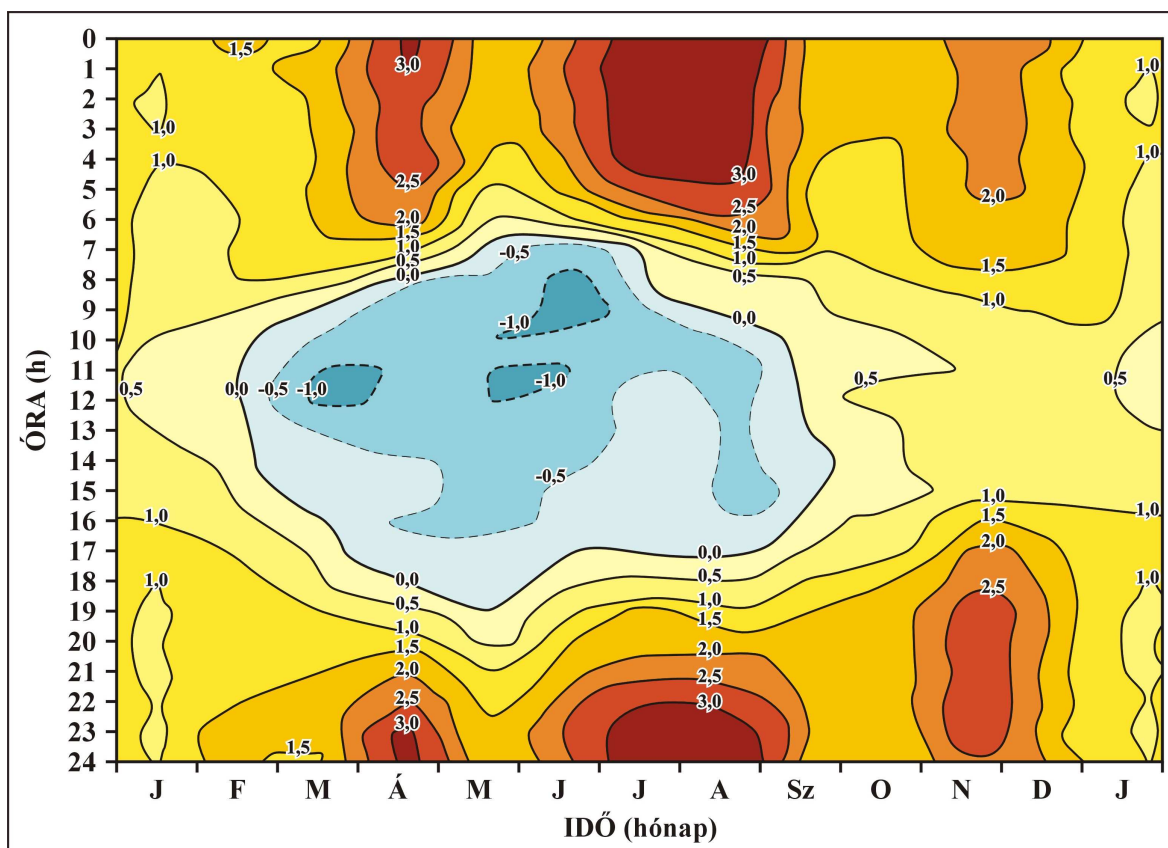


2.3.2. ábra A város és a külterület hőmérsékleti szempontból eltérő viselkedése optimális helyzetben: (a) hőmérséklet napi menete ($^{\circ}\text{C}$), (b) a lehűlés és felmelegedés üteme ($^{\circ}\text{C h}^{-1}$) a városban és a külterületen, valamint (c) a hősziget intenzitása ($^{\circ}\text{C}$) (Oke, 1982)

A hősziget-intenzitás jellegzetes napi menetet és a városon belül meglehetősen eltérő mértéket mutat. A napi menet legfőbb jellemzője (2.3.2. ábra), hogy a késő délutáni és az esti mérsékeltebb lehűlés miatt a hajnali minimumhőmérséklet nem olyan alacsony, mint a külső területeken. Ugyanakkor napkelte után a város légtére lassabban melegszik fel. Ezek eredőjeként a hősziget intenzitása napnyugta után gyorsan növekszik és kb. 3–5 órával ké-

sőbb éri el a maximumát (*Oke and Maxwell, 1975*). Az éjszaka hátralévő részében lassan, de egyenletesen csökken a különbség a hőmérsékletek között, majd a csökkenés napkeltekor felerősödik. Tehát a nap folyamán a hősziget intenzitásának mértékét a lehülési és felmelegedési ütemek eltérései szabályozzák. Összességében elmondható, hogy a külterületi ütemek görbéi általában meredekebbek a városiaknál.

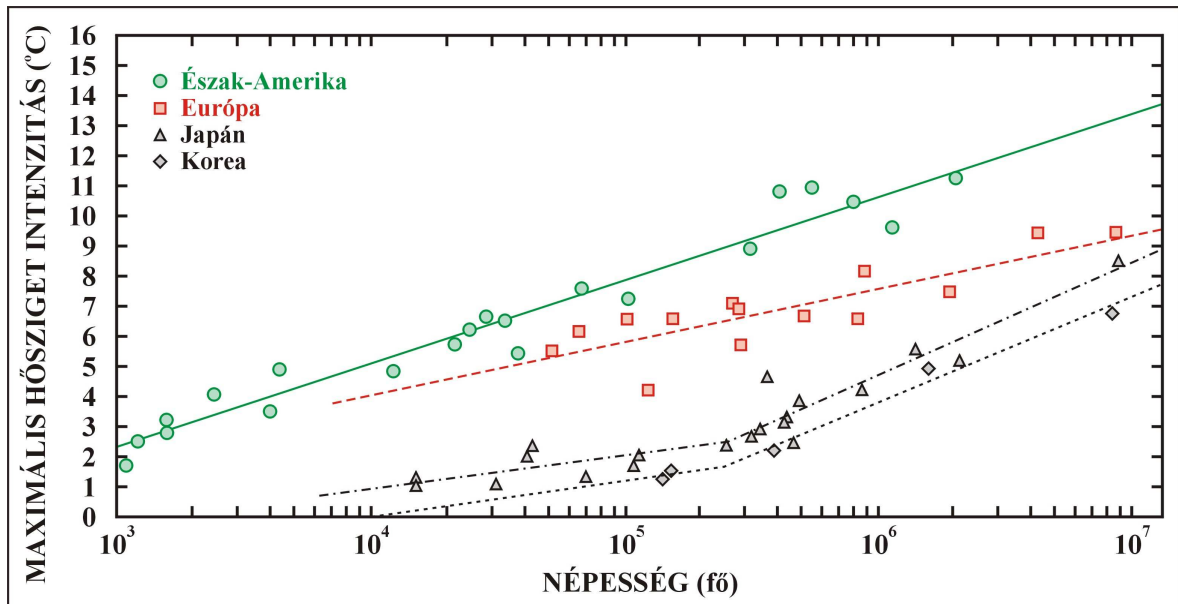
A 2.3.3. ábra izopléták segítségével együttesen szemlélteti a hősziget intenzitásának napi és éves menetét. A belvárosi és külterületi állomás órás adatain alapuló vizsgálat szerint 7 és 18 óra között alig lép fel különbség, sőt néha negatív is lehet. A negatív értékek tavasszal és nyáron jelentkeznek, a legnagyobbak dél körül, míg ősszel és télen egész nap pozitív a különbség. A legerőteljesebb pozitív értékek éjszaka mutathatók ki (szintén nyáron), télen az intenzitás valamivel mérsékeltebb. Összességében az év folyamán kb. 80%-ban a különbség pozitív, vagyis az órás értékek tükrében az év nagy részében a város melegebb környezeténél.



2.3.3. ábra A hősziget intenzitásának éves és napi változása (Bochum, Németország)
(Kuttler, 1990)

2.3.2. A hősziget erősségére befolyást gyakorló tényezők

A hősziget intenzitása szoros kapcsolatban áll a település méretével. A város nagyságának egyik lehetséges mérőszáma a lakosok száma (P). A 2.3.4. ábra szerint még az 1000 fős településeken is kimutatható a hősziget. Milliós nagyvárosok esetén a lehetséges legnagyobb hőmérsékleti módosulás $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ körül alakul. Látható bizonyos eltérés a görbék meredekségében az észak-amerikai és európai városok között és külön érdekesek a japán és koreai városok a görbék törései miatt. Az eltérések oka nyilván az, hogy a világ különböző területein jelentősen mások a várostervezés, a városépítés elvei és hagyományai, ezért a városok méretének a lélekszámmal történő jellemzése sok esetben nem kielégítő a tanulmányozott fizikai jelenség magyarázatára, ugyanis a hősziget intenzitásának szempontjából egyáltalán nem elhanyagolható, hogy szellősen elhelyezett, alacsony épületek vagy a tömör, magas beépítés dominál az adott településen.



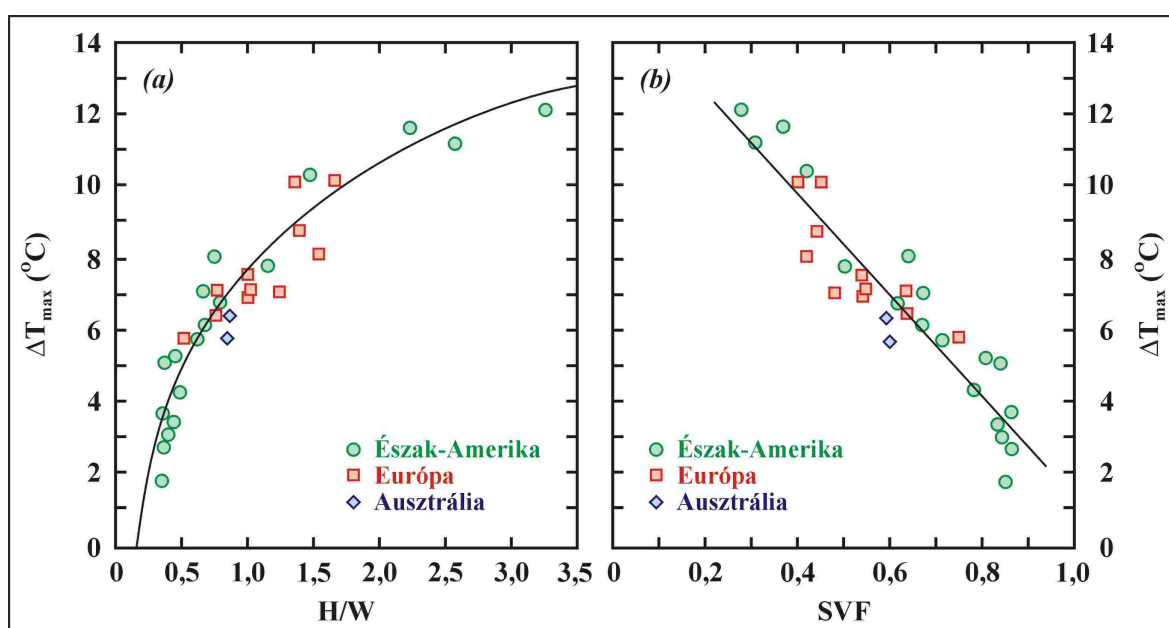
2.3.4. ábra A hősziget intenzitásának maximuma (ΔT_{max}) és a népesség száma közötti kapcsolat észak-amerikai, európai, japán és koreai településeken (Oke, 1979; Park, 1987)

Ezért felmerül, hogy a beépítettség jellege és a hősziget intenzitása között is kell lennie valamilyen összefüggésnek. A város geometriai szerkezetének jellemzésére egy lehetséges megközelítés az, hogy hogyan viszonyulnak egymáshoz az utcáknak és az ott lévő épületeknek a méretei. Minél magasabbak ugyanis az utcában lévő házak, annál inkább akadályt jelentenek a hosszúhullámú kisugárzás számára, vagyis annál kisebb az utcákban a lehűlés üteme. Bevezethető a H/W arány, ahol H – az épületek átlagos magassága és W – az utcák átlagos szélessége (Landsberg, 1981). A vizsgálatok szerint így egy logaritmikus kifejezés állítható fel a maximális intenzitású hősziget nagyságára (Oke, 1981):

$$\Delta T_{\max} = 7,54 + 3,97 \cdot \ln(H/W) \quad (^\circ\text{C})$$

A két mennyiség közötti szoros kapcsolatot szemlélteti a 2.3.5.a ábra, amelyen több kontinens városából származó adatok szerepelnek.

Másik, a H/W aránytól nem teljesen független beépítettségi mutató az égboltláthatósági érték (sky view factor – SVF), amely megadja, hogy egy adott helyről az égbolt hányad része látszik, vagyis hogy a felszín hosszúhullámú kisugárzása számára mennyire korlátozott vagy szabad az út. Az SVF változásának hatását a hősziget maximális értékére a 2.3.5.b ábra szemlélteti, több városból nyert adatok alapján. Tehát ezen a módon is világosan megmutatkozik a szoros kapcsolat a zártabb beépítettség és a magasabb városi hőmérséklet között.



2.3.5. ábra A hősziget intenzitásának maximuma (ΔT_{\max}) és (a) a városközpontban lévő utcák átlagos magassága/szélessége (H/W) közötti kapcsolat és (b) a település központi részein mért SVF közötti kapcsolat néhány kontinensen (Oke, 1981, 1988)

A hősziget kifejlődésének mértékét azonban az időjárási tényezők (különösen a szél és a felhőzet) is jelentősen befolyásolják. Kialakulására kedvezőek a magasnyomású (anticiklonális) helyzetek, amikor általában derült az ég és közel szélcsend van. A felhőzet hatását a felhőfajták eltérő jellege miatt elég nehéz számszerűsíteni. Az erős szél a hőszigetet nagymértékben gyengíti, sőt akár meg is szüntetheti. A nagyobb városok intenzívebb hőszigetet képesek generálni, ezért minél nagyobb lélekszámú a település, annál nagyobb erősségű szél szükséges a termikus különbségek kialakulásának megakadályozására. A kapcsolatot a kritikus szélesség (v) és a lakosságszám (P) logaritmusá között a következő képlet (Oke and Hannell, 1970) adja meg:

$$v = 3,41 \cdot \lg P - 11,6 \quad (\text{ms}^{-1})$$

Így a kritikus szélesebbesség Szeged esetén $v = 6,2 \text{ ms}^{-1}$ (Károssy és Gyarmati, 1980).

2.3.2. táblázat (a) Jellemző felszíni és légköri tulajdonságok, valamint (b) a városklíma paramétereinek megváltozása egy közepes földrajzi szélességen fekvő, kb. 1 millió lakosú nagyvárosban (a közölt értékek külön megjegyzés hiányában a nyári időszakra vonatkoznak) (Oke, 1997)

(a) Tulajdonság	Változás	Jellemző nagyságrendek
albedó	alacsonyabb	vidék: 0,12–0,20; külváros: 0,15; város: 0,14
emisszivitás	nagyobb?	vidék: 0,92–0,98; város: 0,94–0,96
antropogén hő	nagyobb	vidék: -; külváros: 15–50 Wm ⁻² ; város: 50–100 Wm ⁻² (téli 250 Wm ⁻² -ig)
kondenzációs magvak: Aitken felhő	nagyobb nagyobb	vidék: 10 ² –10 ³ cm ⁻³ ; város: 10 ⁴ –10 ⁶ cm ⁻³ vidék: 2–5×10 ² cm ⁻³ ; város: 10 ³ –10 ⁴ cm ⁻³
(b) Elem	Változás	Nagyságrendi változás vagy megjegyzés
turbulencia-intenzitás	nagyobb	10–50%
szélesebbesség	csökken növekszik	5–30% erős áramlásnál (10 m magasságban) a hősziget hatására kialakuló gyenge áramlásnál
szélirány	eltérül	1–10°
UV-sugárzás	sokkal kevesebb	25–90%
napsugárzás	kevesebb	1–25%
infravörös bevétel	nagyobb	5–40%
látótávolság	csökken	
párolgás	kisebb	kb. 50%
konvektív hőáramlás	nagyobb	kb. 50%
hőtárolás	nagyobb	kb. 200%
lég hőmérséklet	magasabb	1–3 °C több éves átlagokban, de órás átlagban akár 12 °C is
lég nedvesség	alacsonyabb sokkal magasabb	nyáron nappal nyáron éjszaka és télen egész nap
felhőzet	több pára több felhő	a városban és a város lee-oldalán a város lee-oldalán
köd	több vagy kevesebb	az aeroszoloktól és a környezettől függ
csapadék: hó összes zivatarok	kevesebb több több	egy része esővé válik inkább a város lee-oldalán, mint a városban

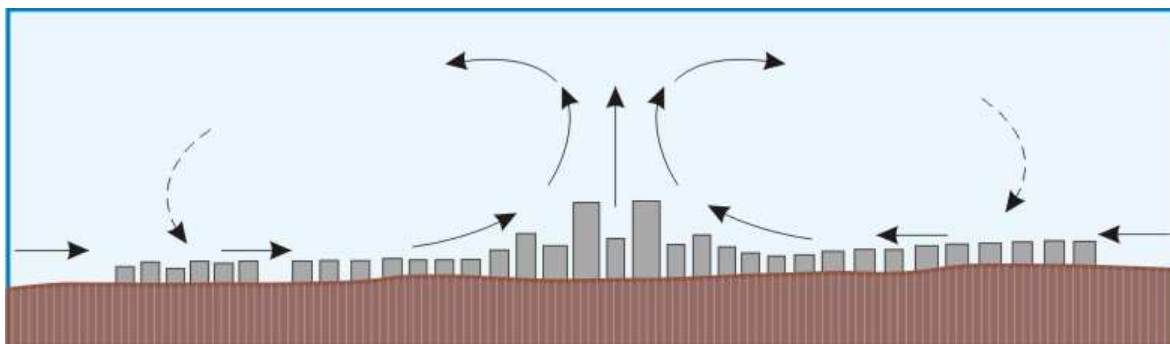
A nyári hőterhelések csökkentésében jelentős szerep juthat a városon belüli fásításnak, a zöldövezetek kialakításának. A nagyobb zöldterületek mérséklő hatása néhány 100 m-ig észlelhető. Ezek a – gyakran öntözött – párologtató és ezért hűvösebb felszínek különösen a dél körüli órákban fejtik ki kedvező hatásukat. Nemcsak a zöldfelület nagyságának, hanem növényzet összetételének is jelentős szerepe van a hőmérséklet alakulásában, ugyanis a például a kb. 40%-os beépítettségű fásított lakótelep a legterhelőbb időszakban hűvösebbnek bizonyul a fátlan városkörnyéki (füves, gyomos) területnél is (*Probáld, 1976*).

A felszíni és légköri tulajdonságok, valamint az eddig említett és további klímaparaméterek módosulásának egy általános összefoglalását nyújtja a 2.3.2. táblázat, amelynek tanulmányozásánál azonban figyelembe kell venni azt, hogy az egyes városok esetében – az egyedi sajátosságok miatt – jelentős eltérések is lehetnek a feltüntetett értékektől.

2.3.3. A hősziget közvetlen hatásai

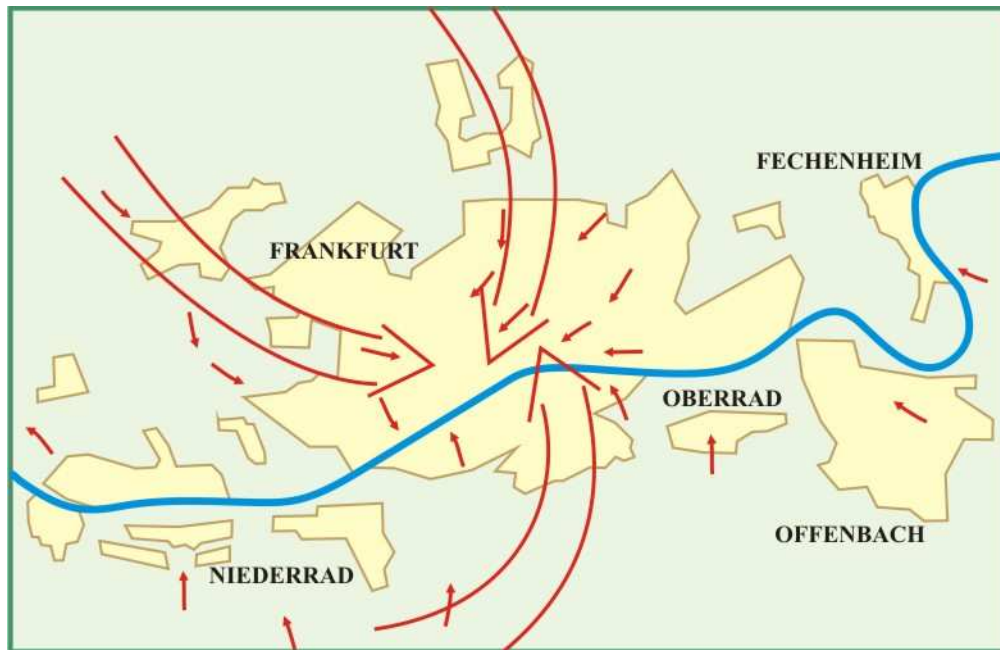
A város általában csökken a szélsébség az érdes felszín fékező hatása miatt, de a csökkenés mértéke függ az eredeti szél erősségétől is, sőt, lassú légáramlás esetén megfordul a helyzet, ugyanis a város felett növekedés mutatkozik (2.3.2. táblázat). Ez azzal magyarázható, hogy a hősziget miatt a város felett kialakuló fokozott feláramlás a mozgásmennyiség erőteljesebb kicserélődését, vagyis a felszínközeli szélsébség növekedését vonja maga után (*Probáld, 1980*). Nagyobb szélsébségek esetén viszont a városi felszín által okozott sűrűlőds szerepe válik meghatározóvá.

Ha gyengék a nagyléptékű légáramlások, akkor az előzőekben említettek szerint a beépített terület általában melegebb a környezeténél, ami az alsóbb légrétegekben a külterület felől a városközpont felé irányuló áramlást indít el. Ez a városi szél (angolul country breeze, azaz vidéki szellő, ami a magyar szakkifejezésnél találóbb, mert valóban a vidék felől fúj a város felé), amelynek iránya a nap folyamán nem fordul meg, mert a város csaknem mindig melegebb a környező területeknél.



2.3.6. ábra A városi hősziget által keltett cirkuláció vázlata

Az általában rendkívül tagolt, érdes városi felszín erőteljes súrlódási hatást fejt ki a központ felé összeáramló levegőre és jelentősen lassítja azt. Ezért csak egy bizonyos küszöböt meghaladó város-vidék termikus különbség esetén indulhat be a cirkuláció. Kialakulásának hajtóerői és hatásterülete szerint meg lehet különböztetni a városi szél nappali és éjszakai változatát. Nappal a városban a környezeténél magasabb hőmérséklet elsősorban az épületek felmelegedett tetőinek szintjében mutatkozik, amely a belváros felett erőteljes függőleges feláramláshoz vezet. Ennek pótlására a külső területek felől a tetőszint felett indul meg egy befelé tartó áramlás (2.3.6. ábra). Éjszaka a városi hőmérsékleti többlet az utcák szintjében jelentkezik, ezért a városi szél a felszín közelében mutatható ki (2.3.7. ábra). A beáramlás mélysége nagymértékben attól függ, hogy vannak-e a városban kívülről a központ felé elnyúló, részben zöld területek, ún. ventilációs folyosók, amelyeknek kisebb az érdekességük és így kevésbé akadályozzák a cirkulációt. Ilyen szerepet általában parkok, folyómedrek, utak és vasúti pályák tölthetnek be.



2.3.7. ábra Éjszakai összeáramlás nyugodt időjárási helyzetben, Frankfurtban
(Stummer, 1939)

A városi szél sajátossága, hogy működése esetén tulajdonképpen a kialakulását előidéző tényezők ellen hat, amely miatt egy bizonyos periodikusságot mutat a megfigyelések szerint. Ugyanis a külterületről a centrum felé összeáramló levegő a kiegyenlítő hatás következtében gyengíti a hőszigetet, aminek következtében csökken a cirkulációt fenntartó hőmérsékleti különbség. Ha ez a különbség az előbbieken említett küszöb alá esik, akkor a légáramlás leáll. Ezután viszont a hűtőhatás hiányában a városi hősziget újra megerősödik, és egy idő után ismét elindítja a városi szelet.

A településeken az emberek az utca szintjében, a házak között megrekedt szennyezett levegőben élnek, amely szennyezésért ebben a szintben elsősorban a gépjármű-használat a felelős. Ehhez társul még – főleg a nyári időszak fülledt estéin – a fokozottan melegebb környezet hőterhelése is. Szélcsendes vagy gyengén szeles időszakokban ezek a kellemetlen, egészségkárosító és közérzetet rontó hatások még hatványozottabban jelentkeznek. Csökkentésükben nagy jelentősége lehet a beáramló városi szélnek, aminek kialakulására egyébként is csak ilyen időjárási helyzetekben van reális esély. Ezen belül is az éjszakai változatnak van fontosabb szerepe, mert az a felszín mentén szállítja a külterületek tisztább és hűvösebb levegőjét a belső városrészek felé.

A fentiekben felsoroltak miatt a várostervezés, városrendezés során nagyon fontos feladat a városi levegőkörnyezet minőségének javítása és ezzel összefüggésben a városi szél kialakulásának elősegítése, ugyanis pozitív hatását csak bizonyos feltételek mellett képes kifejteni. A gyakorlatban ez a ventillációs folyosók felderítésével, újak kialakításával, a meglévők bővítésével és az esetleges beépítések megakadályozása révén valósulhat meg. A városlakók egészségének és jó közérzetének érdekében alapvető fontosságú, hogy ez a hasznos levegőcsere-folyamat zavartalanul kialakulhasson, illetve fennmaradhasson.

A légtér komfortértékét a hősziget is – mint klimatikus jelenség – jelentősen befolyásolja. Nyáron a város felmelegedése bioklimatológiai szempontból rendkívül kedvezőtlen (az alacsony és közepes szélességeken), télen viszont kifejezetten előnyös. Emellett a város melegebb volta miatt meghosszabbodik a fagymentes időszak és ezzel a növények vegetációs időszaka, eltolódnak a fenológiai fázisok, csökken a fagyok intenzitása, csökken a fagyos és téli napok száma, megrövidül a hótakaróval borítottság ideje, valamint csökken az ún. fűtési napok száma, ami természetesen mérsékli a fűtésre felhasznált energia mennyiségét is. Minél közelebb vannak a házak egymáshoz (általában ez a jellemző a belső területeken), annál nagyobb védelmet nyújtanak egymásnak az időjárás szélsőségei ellen, és relatíve annál kevesebb energia felhasználására van szükség. A 2.3.3. táblázat különböző elrendezésű családi házak esetében szemlélteti ezt a viszonylagos különbséget.

2.3.3. táblázat Különböző elhelyezkedésű családi házak egymáshoz viszonyított fűtési energiaigénye (Landsberg, 1981)

<i>Házelrendezési típusok</i>	<i>Viszonylagos fűtési energiaigény</i>
sűrű elhelyezkedésű városi sorház	1,0
nyílt elhelyezkedésű városi sorház	1,3
szabadon álló ikerház	1,5
szabadon álló családi ház, közel a másikhoz	1,7
szabadon álló családi ház	2,1

A városklímának az emberre gyakorolt hatásai összefoglalásképpen a következők: télen főleg a sugárzási, nyáron elsősorban a hőmérsékleti viszonyok megváltozása előnytelen, aminek megítélése természetesen függ attól is, hogy az adott város milyen szélességi körön, milyen klimatikus régióban fekszik. Hűvösebb területeken kifejezetten előnyös is lehet a hőmérséklet néhány fokos emelkedése. Majdnem egész évben kedvezőtlen a szélviszonyok alakulása, viszont a légnedvességbeli eltérések hatásai viszonylag csekélyek.

A városi levegőkörnyezetben a meteorológiai paraméterek megváltozásai a természetes viszonyokhoz képest – különösen milliós nagyvárosok esetében – több terhelő hatást válthatnak ki, ami ronthatja az itt élők komfortérzetét. Mindez a levegő szennyezettségével párosulva – amely akár százezres nagyságrendű városok esetében is igen nagy lehet – már kimutatható egészségromlást eredményez az élő szervezetekben. Parkosítással, a szennyező üzemek kitelepítésével, a fűtési szerkezet átalakításával, a városrészek rekonstrukciójánál az előzetes éghajlati méréseredmények figyelembevételével stb. az említett hátrányos, illetve káros hatások nagymértékben csökkenthetők vagy megszüntethetők.

3. A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ VÁROSKLIMATOLÓGIAI KUTATÁSOK **RÖVID ÖSSZEFOGLALÁSA**

3.1. A külföldi kutatások rövid összefoglalása

Az ókor óta ismert az a tény, hogy a városok levegője különbözik környezetükétől. Már *Hippokratész* (i.e. 5. század) utalt a rossz városi levegőre, amely szerinte egészségkárosító hatású az emberre nézve. Tehát az urbanizáció legkorábban felismert következménye a levegő összetételének megváltozása volt. Ennél is konkrétabb utalás történik az ókori Róma füstszennyezésére *Horatius* (i.e. 1. század) ódáiban és *Seneca* (1. század) írásaiban (*Neumann, 1979*).

A középkor óta problémát jelentett a hűvösebb éghajlatú településeken a széntüzelésből származó füst: például Londonban *I. Edward* király a 14., *I. Erzsébet* királynő pedig a 16. században tiltotta meg egy időre a kőszénrel való fűtést. A manufaktúrák megjelenése idején nyilvánvalóvá vált a faszenet kiszorító kőszén nagymennyiségű elégetése következtében fellépő légszennyeződés. Az angol *Evelyn* 1661-ben így írt erről: „Mert miközben mindenütt máshol az ég derült és a levegő tiszta, itt a világosságot hozó Napot elhomályosítja a kénből képződött felhő, amin a sugarak alig képesek áthatolni. A kimerült utazó még mielőtt meglátná úti célja városát, már több mérfölddel előbb megérzi annak szagát.” 1750-ben a London feletti füstréteget már 100 km-ről is lehetett látni (*Kratzer, 1956*).

A 17. század végén néhány helyen megkezdődtek a rendszeres, műszerekre alapozott észlelések. Ennek eredményeképpen a város és környékének meteorológiai elemei között felismerhető különbségek jelentek meg a mért adatokban. 1783-ban a német *Deuer* Mannheimben a külváros és a botanikus kert között 6°C-os különbséget talált egy hideg téli éjszakán. A városi éghajlat alapvető jellegzetességeinek felismerése és az első városklíma leírás az angol *Howard*-nak (1818) tulajdonítható, aki a londoni éghajlat és légszennyezettség sajátosságait tárgyalta. Legjelentősebb felismerése az volt, hogy a város központja melegebb, mint a környező vidéki területek (*Landsberg, 1981*).

A „városklíma” kifejezést elsőként a német *Stifter* használta 1843-ban. A francia *Renou* 1862-ben Párizs példáján keresztül erősítette meg a város és környezete között fennálló termikus különbséget. 1909-ben a német *Kremser* berlini vizsgálatai során először állapította meg, hogy a légnedvesség és a szél is módosulásokat szenved (*Fezer, 1995*).

Az 1927-es esztendő jelentős előrelépést hozott a kutatásban, ugyanis az osztrák *Schmidt* Bécsben biciklire, majd autóra szerelhető műszerekkel többször is átszelte a város különböző beépítettségű területeit, hogy hőmérsékleti adatokat gyűjtsön. Ez az eljárás, több városi és városkörnyéki állomás méréseivel kiegészítve, a mai napig is használatos módszer. Ugyanekkor a német *Schmauss* München klímamódosító hatásának vizsgálata

révén először mutatta ki a nagyvárosi területek (lee-oldali) csapadéktöbbletét (*Landsberg*, 1981).

A városklímáról az első nagy összefoglaló alapmű 1937-ben jelent meg a német *Kratzer Benedek* rendi apát tollából. A könyv bővített formája 1956-ban látott napvilágot.

Az 1950-es és '60-as években egyre szélesebb körben indult meg a városklíma egyik legfontosabb megnyilvánulásának, az UHI-nak a tanulmányozása. Maga a „hősziget” kifejezés *Balchin and Pye* (1947) munkája nyomán honosodott meg. Vizsgálata elsősorban Európa és Észak-Amerika városaiban folyt, például: Uppsalában (*Sundborg*, 1950, 1951) és Londonban (*Chandler*, 1960, 1962, 1967), illetve Kaliforniában (*Duckworth and Sandberg*, 1954; *Mitchell*, 1961). A kutatás középpontjában az állt, hogy a városi morfológia, a domborzat, valamint az időjárási elemek és helyzetek változása milyen hatást gyakorol a hősziget kifejlődésére, illetve annak milyen (napi, heti és évszakos) dinamikája van.

Az 1970-es és '80-as években tovább folytatódtak, illetve bővültek ezek a vizsgálatok, s a nemzetközi szakirodalomban újabb kontinensek városai is feltűntek (pl. Tokió – *Fukui*, 1970; Mexikóváros – *Jauregui*, 1973). A kutatás első vonalát azonban kétségtelenül Észak-Amerika képviselte: megjelent az amerikai *Landsberg* (1981) összefoglaló műve és megkezdte tevékenységét a kanadai *Oke* is. Előtérbe kerültek a hősziget intenzitásának, térbeli és időbeli kiterjedésének statisztikai modellezésére irányuló kísérletek (pl. *Oke*, 1973; *Park*, 1986). Az elmúlt néhány évtized kutatásaira az a jellemző, hogy egyre több modell készül, amelyek megpróbálják reprodukálni, illetve meghatározni a város energetikai (pl. *Arnfield and Grimmond*, 1998) és sugárzási folyamatait (pl. *Voogt and Oke*, 1991), hőtárolását (pl. *Grimmond et al.*, 1991) vagy vízegyenlegét (pl. *Grimmond and Oke*, 1991).

Oke (1984) és *Svensson et al.* (2002) szerint a modellek három típusát alkalmazzák a városklíma-kutatásokban, ezek a következők: numerikus, fizikai és empirikus modellek. A numerikus modellek széles körben elterjedtek és folyamatos a fejlesztésük, finomításuk (pl. *Thielen and Troude*, 2001; *Masson*, 2006). Különböző szimulációkra használják őket: pl. szélmező, szennyező anyagok szétterjedése, a melegebb levegőkörnyezet és hatásai az energia igényben és a humán komfortban. Fizikai modelleket alkalmaznak a felszínen az érdesség, az áramlás, a sugárzás-átvitel és a felszín energia egyensúlyának feltárására (pl. *Terjung and O'Rourke*, 1980; *Kanda*, 2006). Az empirikus modellekre az a jellemző, hogy tartalmazznak algoritmusokat, mutatókat, műszaki előírásokat és mennyiségi elképzeléseket. Előnyük, hogy a valós világ adataira alapulnak, hátrányuk viszont, hogy gyakran korlátozottak, így csak egy speciális területre alkalmazhatóak. Az empirikus modellek közül a legtöbb statisztikai megközelítéssel próbálja feltárni a kapcsolatot az UHI intenzitás, a meteorológiai és fizikai paraméterek (pl. a felszín tulajdonságait leíró változók) között, amelyek hatással vannak erre a jelenségre. Így ezek a modellek hasznos mennyiségi információkat szolgáltathatnak a fent említett paramétereknek az UHI kifejlődésében és területi el-

oszlásában nyújtott szerepéről (pl. *Oke*, 1981; *Park*, 1986; *Kuttler et al.*, 1996; *Fortuniak*, 2003; *Alcoforado and Andrade*, 2006; *Giridharan et al.*, 2007).

A ΔT területi eloszlása időben módosul mind napi, mind éves szinten. Ez a mintázat felfogható úgy is, mint egy aktuális pillanatban az adott hely, valamint a meteorológiai és városi jellemzők eredménye (*Oke*, 1987). Ha az éves átlagos UHI intenzitást tekintjük, akkor egy sík területen egyszerűsödnek a helyi tényezők (domborzat, vízellátottság), így eloszlása és mérete főleg a városi összetevők eredménye (*Lowry*, 1977). Annak a meghatározása, hogy az egyes tényezők mekkora befolyással bírnak az UHI intenzitására és kifejlődésére, igen bonyolult, hiszen a városok vertikális és horizontális struktúrája nagyon összetett. A 3.1.1. táblázat egy rövid áttekintést nyújt azokról a tanulmányokról, amelyek a ΔT modellezésére irányulnak, felhasználva függő változóként részben vagy egészben a városi felszínparamétereket. Meg kell említeni, hogy a legtöbb (a listán szereplő) tanulmány gyenge pontjának a validációs kísérletek hiányát tekinthetjük.

A modellekhez az adatokat egyre szélesebb körben és igen különböző módszerekkel gyűjtik, így például a városi légtér meteorológiai paramétereinek függőleges eloszlásáról is: magas tornyok (pl. *Roulet*, 2003), kikötött ballonok, lassan emelkedő rádiószondák és helikopterek felhasználásával. A repülőgépes és műholdas infravörös sugárzásmérések is hasznos adalékkal járulnak hozzá az elemzésekhez (pl. *Dousset and Gourmelon*, 2003; *Stathopoulou et al.*, 2004; *Chen*, 2006). A rászteres és vektoros térinformatika korszerű eszközei pedig a városi geometria-morfológia minden eddiginél alaposabb felméréséhez járulnak hozzá (pl. *Lindberg et al.*, 2003; *Long et al.*, 2003; *Souza et al.*, 2003; *Ratti et al.*, 2006). Egyes metropoliszokban megkezdődött a városi környezet monitoring rendszerének a kiépítése (pl. *Mikami et al.*, 2003). Továbbá mind nagyobb hangsúlyt kap a városlakók komfortérzetének vizsgálata is (pl. *Matzarakis et al.*, 1999; *Mayer et al.*, 2004; *Nikolopoulou and Lykoudis*, 2006), tehát az, hogy az emberekre mennyire jelent több vagy kevesebb terhelést a meteorológiai paraméterek városi megváltozása – kombinálva a légszennyezettség mértékével – a különböző időjárási helyzetekben, évszakokban és napszakokban.

3.1.1. táblázat Áttekintés azon külföldi és hazai tanulmányokról, ahol statisztikai modellekkel szimulálták az UHI intenzitást, részben vagy egészben városi felszínparaméterek felhasználásával

Függő változó	Független változó	Hivatkozás
ΔT	szélsebesség, felhőzet	Sundborg (1950)
évszakos átlagos ΔT	terepi paraméterek, urbanizáció sűrűsége, épületmagasság	Goldreich (1970)
ΔT	lakosság, szélsebesség	Oke (1973)
maximális ΔT	lakosság	Oke (1973)
ΔT	szélsebesség, felhőzet, légköri stabilitás, forgalom mennyisége, hőmérséklet, antropogén hőveszteség	Nkemdirim and Truch (1978)
átlagos ΔT	tájhasználati típusok területi arányai	Park (1986)
ΔT	szélsebesség, felhőzet, légnyomás	Moreno-Garcia (1994)
ΔT	rövidhullámú besugárzás, szélsebesség, felhőzet	Chow (1994)
ΔT	beépített terület, magasság, szélsebesség, idő, hőmérséklet-amplitúdó	Kuttler et al. (1996)
ΔT	arányossági tényező (függ a mesterséges felület arányától és a szélsebességtől)	Fortuniak and Klysik (1998)
ΔT a $T_{\text{átl}}$, T_{max} , T_{min} számításához	NDVI, felületi hőmérséklet (műholdfelvétel alapján)	Gallo and Owen (1999)
éves és évszakos átlagos ΔT	városközponttól való távolság, beépítettségi arány	Unger et al. (2000)
ΔT	szélsebesség, felhőzet	Morris et al. (2001)
évszakos átlagos ΔT	beépítettségi arány, vízborítottsági arány, égboltláthatóság, épületmagasság	Bottyán and Unger (2003)
ΔT	égboltláthatóság, épülettömeg	Gonclaves et al. (2003)
ΔT	épületsűrűség, épületmagasság, épület térfogat és ke- rület, épületek északi felszínének nagysága	Long et al. (2003)
átlagos ΔT	mesterséges-felület arány, természetes-felület arány, érdesség, NDVI, hő bebocsátás, mesterséges hőfluxus	Szymanowski (2003)
évszakos átlagos ΔT	beépítettségi arány	Bottyán et al. (2005)
ΔT	zöldterület arány, égboltláthatóság, beépített- terület arány, magasság-alapterület arány, felület albedó, tengertől való távolság	Giridharan et al. (2005)
ΔT	zöldterület arány, vízborítottsági arány, beépítettségi arány, tengerszint feletti magasság, folyótól mért tá- volság, utca irányultság	Alcoforado and Andrade (2006)
évszakos átlagos ΔT	zöldterület arány, magasság-alapterület arány, égboltláthatóság, felület albedó, tengertől való távolság, tengerszint feletti magasság	Giridharan et al. (2007)

3.2. A magyar kutatások rövid összefoglalása

Magyarországon 1779-ben kezdődtek meg a rendszeres műszeres meteorológiai megfigyelések Budán azon az állomáson, amely az első nemzetközi észlelőhálózat legkeletibb láncszeme volt akkor. A később létesült budai és pesti éghajlatkutató állomások száma és profilja folyamatosan bővült, de később sajnos számos állomás hosszabb-rövidebb idő után beszüntette működését (*Probáld*, 1974). A főváros éghajlatának megismerése az észlelések anyagának feldolgozásával párhuzamosan haladt, s összefoglaló művek már a 19. század végén (pl. *Kurländer*, 1879) és a 20. század elején (pl. *Prinz*, 1913) is készültek.

Budapest éghajlatáról az első nagy jelentőséggel bíró monográfia, amely már hosszú észlelési sorozatra és egy sor klimatológiai részfeldolgozásra támaszkodott, *Réthy* (1947) nyomán jelent meg. Bőséges adatközlése folytán alapvető forrásmunkának számít még ma is. Néhány évvel később egy nagy földrajzi monográfia keretében *Bacsó* (1958) adott újabb átfogó szintézist a főváros és környéke éghajlati jellemzőiről. Ezek a munkák azonban még nem a helyi különbségeket állították előtérbe, hanem egy állomás észlelési sorozatának sokrétű feldolgozásával rajzolták meg a főváros éghajlati képét.

Az 1950-es évek végétől a városklimatológia gyors fejlődésnek indult. Az előtérben Budapest éghajlatának tanulmányozása állt, hiszen Magyarországon ez jelentette (és jelenti mai is) a legfontosabb és egyben legbonyolultabb kutatási feladatot. A főváros területén a meteorológiai szolgálat 10–12 éghajlatkutató állomást üzemeltetett és 1964–70 között folyamatos észlelésekre került sor a belvárosban is. Nagy fejlődés mutatkozott a sugárzásmérések és az energiaegyenleg meghatározása terén is, valamint létrejött a légszennyeződés változásait figyelemmel kísérő állomáshálózat is.

Budapest városklímájának kiemelkedő színvonalú összefoglaló feldolgozása *Probáld* (1974) munkássága révén jelent meg. A beépítettség szempontjából jellegzetes városi területeken elhelyezkedő állomások adatait a városon kívül található, a városi hatásoktól nagyrészt mentes állomás adataival vetette össze. Részletesen tárgyalta a város hatásait az energiaháztartásra, a hőmérsékletre, a szélviszonyokra, a csapadékra, a légnedvességre, a látástávolságra és a ködre. Külön elemezte a városi légszennyeződés típusait, azok térbeli és időbeli eloszlását. A különböző éghajlati elemek változásait összességében vizsgálva Budapest területén belül éghajlati körzeteket határolt le. Az eredmények értékelését azonban megnehezítették a főváros domborzati viszonyai, amelyek révén – a városi hatástól függetlenül, illetve azokkal kombinálódva – szintén lokális klímák sora alakulhat ki.

Az 1971–75 közötti budapesti mérések eredményeit *Miklósi* (1981) hasonlította össze a 15 évvel korábbiakkal. Mivel a városi hősziget kialakulása Budapest esetében várhatóan télen a legerőteljesebb, ezért a vizsgálat erre az időszakra összpontosított. Az eredmények szerint 15 év alatt a hősziget intenzitásának mértéke kb. 30%-kal megnövekedett. Alacsony szélsébség esetén a hősziget erőssége jelentős volt, míg a mérsékelt szél ezt gyengítette.

A mérőállomások városon belüli elhelyezkedése miatt a mindenkori szélirány is befolyásolta az UHI intenzitás nagyságát.

A rendszerváltozás óta a főváros légszennyezettségével kapcsolatos kutatásokhoz és előrejelzésekhez szükséges adatokat az Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat állomáshálózatának mérései szolgáltatják (pl. *Sándor és Baranka*, 1993). A mérőhálózatot 1978-ban telepítették, és 1990–91-ben teljesen felújították. Az állomások elhelyezésénél ügyeltek arra, hogy minél több környezettípust jellemezhessenek. Valamennyi állomáson mérik a N-oxidokat, a SO₂-t, a CO-t és a port, valamint a különböző meteorológiai paramétereket (szélirányt, szélsébséget, hőmérsékletet és a relatív nedvességet), néhányon a szénhidrogének és az O₃ koncentrációját is észlelik. A monitorhálózat feladata kétirányú: a rutinszerű levegőminőség ellenőrzés mellett ellátja a rendkívüli helyzetek megítéléséhez szükséges méréseket is.

Napjainkban Budapest városklímájának tanulmányozása három tudományos műhelyben (az Országos Meteorológia Szolgálat Éghajlati Osztálya, az ELTE Meteorológia Tanszék és a BMGE Áramlástan Tanszék) folyik. Az egyik kutatási irány a helyi hősziget területi kiterjedésének és időbeli változásának tanulmányozása (*Molnár*, 1998), a második pedig a nagyváros klímamódosító hatásának elemzése újgenerációs műholdképek felhasználásával (pl. *Bartholy et al.*, 2003). A finomfelbontású infravörös műholdképekkel azonban nemcsak a főváros, hanem 9 más magyarországi nagyvárosnak a környezetükhöz viszonyított felszíni hőmérsékleti eltéréseinek elemzése is lehetővé vált (*Dezső et al.*, 2005; *Pongrácz et al.*, 2006b). Az eredmények szerint a legintenzívebb felszíni hősziget a nyári hónapokban, a nappali időszakban figyelhető meg (*Bartholy et al.*, 2005). Újabban a vizsgálat kiterjed a közép-európai nagyvárosokra is (*Dezső et al.*, 2006; *Pongrácz et al.*, 2006a). A harmadik irány az épületek közötti áramlásnak, a szélviszonyoknak és a – többek között – a gépjárművek által kibocsátott szennyezőanyagok terjedési folyamatainak vizsgálata szélcsatornában, ill. numerikus szimuláció segítségével (*Lajos et al.*, 2003). A numerikus szimuláció legújabbban a városi hőmérsékleti különbség által generált cirkuláció modellezésére irányul, Szeged és környezetének digitális domborzatmodelljét és az itt meghatározott városmorfológiai és hőmérsékleti értékeket véve alapul (*Kristóf et al.*, 2006a, 2006b).

Budapesten kívül városklíma-kutatás néhány vidéki városunkban is folyt, vagy folyik. Ebből a szempontból kiemelkedő helyet foglal el Szeged, hiszen a helyi kutatás majd négy évtizedes múltra tekint vissza. Az első vizsgálódás (*Jantos*, 1967) a város belső és külső részeinek hőmérsékleti eltéréseit tárgyalta egy belterületi (a JATE Éghajlattani Tanszékének tetején elhelyezett) és egy külterületi (repülőtéri) állomás 1951–65 közötti adatsora alapján. Az 1973. május-júniusában az Éghajlattani Tanszék által végzett egy hónapos méréssorozat célja egy – akkor még – új lakótelep (Tarján) és egy viszonylag régebbi (Odeszsa) helyi klimatikus sajátosságainak összehasonlítása. Ezt követően *Sindely* (1978) egyetemi doktori értekezésében szintén a tanszéki és repülőtér melletti (ezúttal 1967–71 között-

ti) adatsort használta föl arra, hogy a hőmérséklet és a légnedvesség változásában kimutassa a város hatását.

Óriási előrelépést hozott az a 10 egységből álló, s Szeged városmorfológiailag különböző pontjaiban fölállított állomáshálózat, amely 1977 júniusában *Péczely György* professzor előkészítő munkájának köszönhetően kezdte meg működését. Magyarország vidéki városainak viszonylatában máig is egyedülálló rendszer napi három alkalommal gyűjtötte a csapadék, a légnedvesség és hőmérséklet adatokat a hálózat 1981 elején történt megszűnéséig (*Unger, 1997a*). *Károssy és Gyarmati* (1980) az így gyűjtött (1977–79 közötti advekcióna mentes napokon észlelt minimum- és maximumhőmérsékleti) adatokból izoterma térképeket szerkesztett, amelyek jól jellemzik a város hőmérséklet módosító hatását anticiklonális időjárási helyzetben, s amelyet később *Pelle* (1983) egészített ki. *Zsiga* (1983) a napi minimum- és maximum-hőmérsékletek, illetve a város szerkezeti-morfológiai típusai közötti kapcsolatot elemezte, majd az 1931–40 és 1971–80 közötti adatokból kiindulva, a szélirány városon belüli módosulásait tárgyalta (*Zsiga, 1988*).

Az elmúlt másfél évtized szegedi városklíma-kutatását a sokoldalúság jellemezte. Eleinte a vizsgálódások 11 városi és külterületi állomás 3 éves (1978–80) adatsorára támaszkodtak, és jelentősebb területei a következők voltak: a hősziget évszakos szerkezete (*Unger, 1992a*), az UHI évi és napi járása (*Unger, 1992b*), a városi légnedvesség változása (*Unger, 1993, 1999a*), városi területek bioklimatológiai jellegzetességei (*Unger, 1995, 1998, 1999b*), makroszinoptikus helyzetek és a hősziget erősségének kapcsolata (*Unger, 1996a*), az UHI és a szél, valamint a fűtési energiaigény összefüggései (*Unger, 1996b, 1997c, 1997d; Unger and Makra, 2007*).

1999. március – 2000. február, illetve 2002. április – 2003. március között Szegeden a maximális UHI intenzitás területi eloszlásának vizsgálatához hőmérsékleti adatok gyűjtése folyt meghatározott útvonalon haladó mérőautók segítségével kb. 7–10 naponta (*Sümeghy és Unger, 2003a, 2004a, 2004b; Sümeghy et al., 2003, 2004b; Unger et al., 1999, 2001a, 2001c*). Az UHI időbeli dinamikájának tanulmányozására a 2002–2003-as mérési kampány kiegészült egy havi gyakoriságú, városi keresztmetszet mérési sorozattal, amely révén részletesen elemezhető a hősziget fel- és leépülése (*Sümeghy és Unger, 2003b, 2006; Sümeghy et al., 2006a, 2006b, Unger et al., 2001b*).

2003-ben kezdődött meg Szegeden a városi felszín geometriájának felmérése térinformatikai módszerekkel. Ezáltal lehetőség nyílt a következő felszínparaméterek meghatározására: beépítettségi arány, vízborítottsági arány, átlagos égboltláthatóság (Sky View Factor – SVF), átlagos kompaktság, súlyozott térbeli kompaktság. A kapott felszínparaméterekből statisztikai modell-egyenletek készültek az UHI intenzitás területi eloszlásának közelítésére (*Balázs et al., 2004, 2005a, 2005b; Bottyán et al., 2003; Gál et al., 2004, 2005a, 2005b; Sümeghy et al., 2004a; Unger, 2004, 2006; Unger et al., 2003, 2004, 2006b, 2006c, 2006e; Unger és Sümeghy, 2005*). A vizsgálatokból kiderült, hogy a ΔT mértékére

és eloszlására a legnagyobb befolyással a beépítettségi arány van. A 2002–2003-as periódusban a hőmérsékleti mérések Szegeden és Debrecenben párhuzamosan folytak, így érdekes és újszerű összehasonlításra nyújtanak lehetőséget. A két város beépítettségi adataiból statisztikai modell-egyenletek készültek a városi hőmérsékleti többlet területi eloszlásának közelítésére (*Balázs et al.*, 2006, 2007, 2008; *Unger et al.*, 2006a; *Balázs és Unger*, 2007).

Az említett városklíma-kutatásokkal párhuzamosan több vizsgálat is folyik a városok környezetmódosító hatásainak megismerésére, modellezésére. Ennek egyik ága a már említett áramlástan vizsgálat, amely a városi hőmérsékleti különbség által generált cirkuláció modellezésére irányul, Szeged és környezetének digitális domborzatmodelljét és az itt meghatározott városmorfológiai és hőmérsékleti értékeket véve alapul (*Kristóf et al.*, 2006a, 2006b). A város 3D-s adataiból lehetőség nyílt a város érdességének, valamint a teljes területre az égboltláthatósági mutató pontos meghatározása, illetve ezek hatásainak elemzése a városi hőszigetre (*Unger et al.*, 2006d; *Gál and Sümeghy*, 2007; *Gál et al.*, 2007). A kutatások további fontos iránya a városi növényzet fenológiai módosulásainak feltárása (*Gulyás et al.*, 2003a), illetve a különböző városi mikrokörnyezetek humán bioklimatológiai kiértékelése és modellezése (*Gulyás et al.*, 2003b, 2003c, 2004, 2006; *Gulyás*, 2005; *Unger et al.*, 2005; *Matzarakis and Gulyás*, 2006; *Kántor et al.*, 2007), továbbá a városi levegőkörnyezet mesterséges (*Makra et al.*, 2001; *Kiss et al.*, 2005) és természetes (*Makra et al.*, 2003, 2004; *Makra and Pálfi*, 2007) eredetű szennyeződésének feltárása.

A hazai városklíma-kutatásban Budapest és Szeged után Debrecen a harmadik legfontosabb központ. Itt 1930-ban Berényi Dénes, a Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszékének alapítója, kezdte meg a városklíma kutatásokat (*Szegedi*, 2005). Debrecen éghajlati képét *Justyák és Tar* (1994) foglalta össze az egyetemi meteorológiai állomás hosszú észlelési sorozatának feldolgozásával, a makroklíma vizsgálati módszereivel és nézőpontjából megközelítve. 2000 ősztől kezdődően a debreceni kutatások közös keretek között, párhuzamosan folynak a szegediekkel (*Bottyán and Unger*, 2003; *Kircsi and Szegedi*, 2003a, 2003b, 2004; *Lakatos and Gulyás*, 2003; *Szegedi and Kircsi*, 2003a, 2003b, 2004; *Bottyán et al.*, 2004, 2005; *Baros and Szegedi*, 2005; *Baros*, 2006). Újabb irányzat a különböző méretű települések által kiváltott hősziget nagyságának felmérése és a kifejlődés erősségének feltárása az időjárási paraméterek függvényében (*Szegedi* 2005, 2006; *Szegedi és Baros*, 2006).

2003-tól a Kárpátalján is folynak városklíma-kutatások (*Kakas és Marguca*, 2004), ahol a Debrecenben és Szegeden is használt vizsgálati módszereket alkalmazták, így lehetőség van ezek összehasonlítására. 2005-ben egy éves mérési periódusban, kb. 10 naponta gyűjtöttek hőmérsékleti adatokat Beregszászban, hogy felmérjék az UHI területi eloszlását, valamint vizsgálták a felhőzet, a szél, a talajnedvesség, a hótakaró hatását a hősziget kifejlődésére, továbbá feltárták a statisztikai kapcsolatot a maximális hősziget-intenzitás és a városhatártól mért távolság, illetve a beépítettségi típusok között (*Molnár et al.*, 2006a). A

vizsgálatokat 2006. január és június között félhavi rendszerességgel kiterjesztették 15 településre, így ekkor mérések folytak három városban: Munkácson (82 000 lakos), Beregszászban (26 000 lakos) és Csapon (9 000 lakos), valamint tizenkét környékbeli faluban, melyek népessége 400 és 9 000 fő között változott. Tanulmányozták a településméret és a maximális UHI intenzitás közötti összefüggéseket, melyek alapján kifejlesztettek egy, a népességszámon alapuló és a maximális hősziget-intenzitást előrejelző empirikus modellt (*Molnár et al.*, 2006b). *Molnár* (2007) többváltozós statisztikai modellt alkalmazott a beregszászi hősziget és a különböző felszínparaméterek kapcsolatának feltárására.

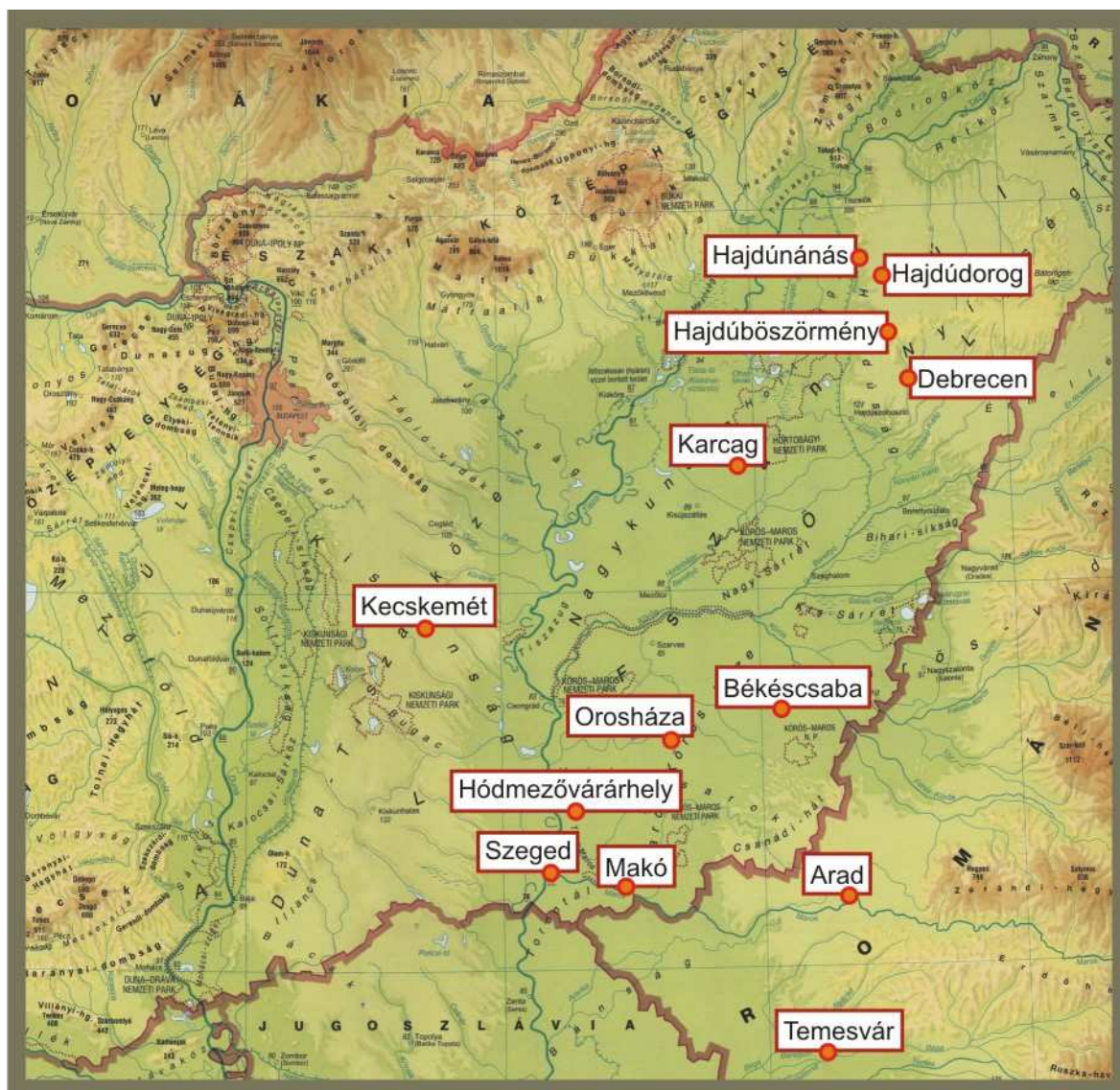
Megemlítendő, hogy a 80-as években Egerben is folyt városklíma-kutatás. A mérések 1983-ban kezdődtek el egy 9 állomásból álló hálózat keretében (*Roncz*, 1985). Az eredmények szerint a Bükk-hegység közelsége és a város völgyi helyzete miatt jellegzetes városklíma nem alakulhatott ki, de enyhe hőmérsékleti többlet azért kimutatható a belvárosban. A domborzat szélárnyékoló hatása a csapadék városon belüli területi eloszlását is módosította.

4. A VIZSGÁLT TERÜLETEK, ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

4.1. A vizsgált városok földrajzi, éghajlati és szerkezeti adottságai

A következő hazai és határmenti alföldi városokra terjed ki a vizsgálat: Arad, Békéscsaba, Debrecen, Hajdúböszörmény, Hajdúdorog, Hajdúnánás, Hódmezővásárhely, Karcag, Kecskemét, Makó, Orosháza, Szeged, Temesvár (4.1.1. ábra). Szegedre és Debrecenre a modell megalkotásához, a hajdúsági városokra a modell validációjához van szükség, míg a modell kiterjesztése a többi városra vonatkozik.

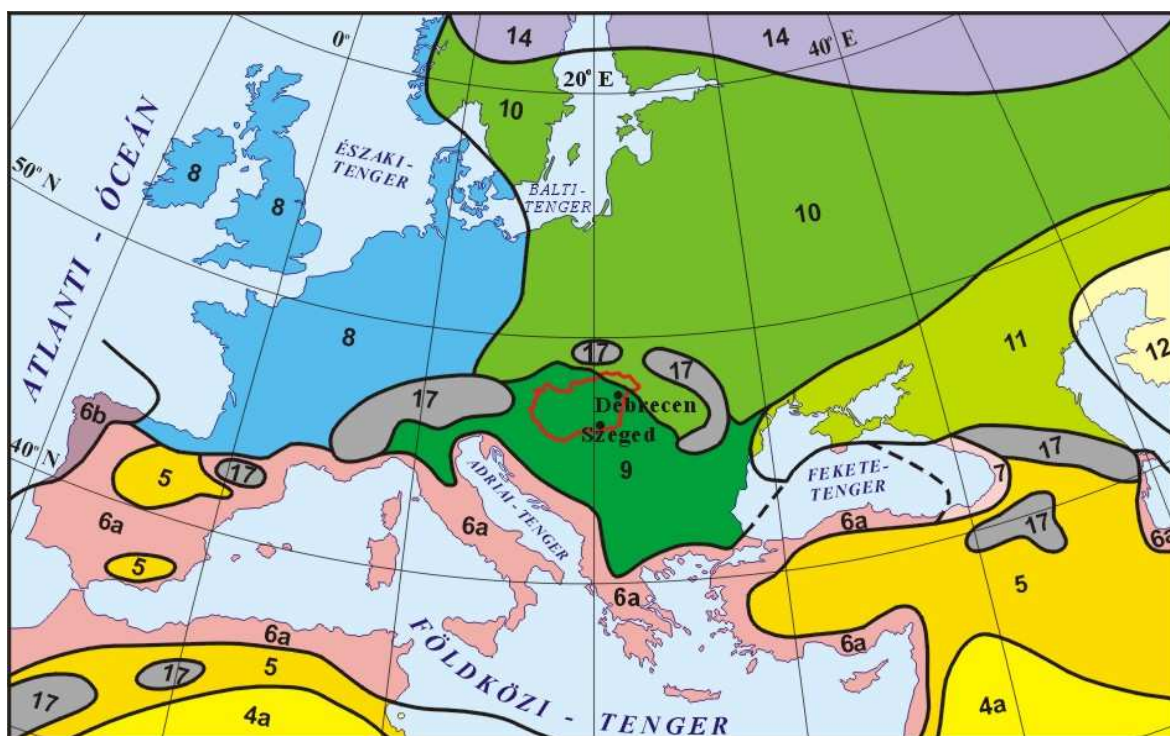
A vizsgált területek Európa középső részén, a Kárpát-medence belsejében elterülő mintegy 100 000 km² kiterjedésű síkságnak, az Alföldnek a (sík) felszínén fekszenek, nagy távolságra a klimatikus szempontból is jelentős hegységektől és tengerektől (4.1.2. ábra).



4.1.1. ábra A vizsgált hazai és határmenti alföldi városok

A nagyléptékű éghajlati felosztást tekintve Magyarország nagyobbik része, így a vizsgált városok térsége is, a Köppen-féle Cf (meleg–mérsékelt éghajlat, egyenletes évi csapadékeloszlással), vagy más felosztás szerint a Trewartha-féle D.1 (kontinentális éghajlat, hosszabb meleg évszakkal) klímaövezetbe tartozik. Péczely (1984) azonban ez utóbbit a valóságos éghajlati viszonyok még jobb megközelítése érdekében módosította (4.1.2. ábra), ez alapján a vizsgált területek a nedves kontinentális éghajlatba esnek hosszabb meleg évszakkal.

Erre a klímaövezetre az a jellemző, hogy legalább 3 hónap középhőmérséklete magasabb 18 °C-nál, és a 0 °C-nál alacsonyabb középhőmérsékletű hónapok száma háromnál nem több. A leghidegebb hónap középhőmérséklete -3 °C-nál magasabb. Az átlagos évi hőmérséklet ingadozás 15–30 °C között van. A csapadékra a nyári maximum és téli, kora tavaszi minimum jellemző. Az átlagos évi összeg 500–1000 mm között változik. Egész évben a nyugati szelek és mérsékelt övi ciklonok hatása alatt áll.



4.1.2. ábra Európa éghajlati övezetei a módosított Trewartha-féle felosztás szerint: (4a) zonális sivatag; (5) szubtrópusi sztyepp éghajlat; (6a) meleg nyarú mediterrán éghajlat; (6b) hűvös nyarú mediterrán éghajlat; (7) csapadékos nyarú szubtrópusi éghajlat; (8) enyhe telű óceáni éghajlat; (9) nedves kontinentális éghajlat hosszabb meleg évszakkal; (10) nedves kontinentális éghajlat rövidebb meleg évszakkal és hideg téllel; (11) mérsékelt övi sztyepp éghajlat; (12) mérsékelt övi sivatagi éghajlat; (14) szárazföldi szubpoláris éghajlat; (17) hegyvidéki éghajlat (Péczely, 1984)

4.1.1. Szeged földrajzi, éghajlati és szerkezeti adottságai

Szeged környezete természeti földrajzi szempontból az Alsó-Tiszavidékhez tartozik (*Frisnyák et al.*, 1988). Magyarország legalacsonyabban fekvő régiójáról van szó, tengerszint feletti magassága mindössze 78 és 85 m között változik.

A táj kialakításában a geológiai harmadkortól napjainkig tartó süllyedés és a feltöltés játszott vezető szerepet. A történeti korok során a kristályos alaphegységre 3000–3800 m vastag üledék rakódott rá. A felszínen – néhány pleisztocén löszhalomtól eltekintve – holocén üledékek (folyóvízi homok, iszapos homok, agyagos iszap és réti agyag) a jellemzőek. A Tisza alacsony- és magas árterei jól elkülönülnek (*Mezősi*, 1983). A tájképi sajátosságokat az álló- és folyóvízi, valamint az eolikus formák adják, így például az alluviális síkságból eróziós peremmel emelkednek ki a löszhalmok. Ezek infúziós és típusos löszből épülnek fel. A Tisza és a Maros folyók mellékét holtágak és morotva-tavak teszik változatossá.

Az ősi növényzet maradványait a folyók menti ligeterdők, valamint a morotvák hínár- és mocsárvegetációi képviselik. Viszonylag nagy területeket foglalnak el a szikesek és a mocsárrétek. A talajok közül a réti öntéstalaj és a réti csernozjom a leggyakoribbak (*Kevei-né Bárány*, 1988).

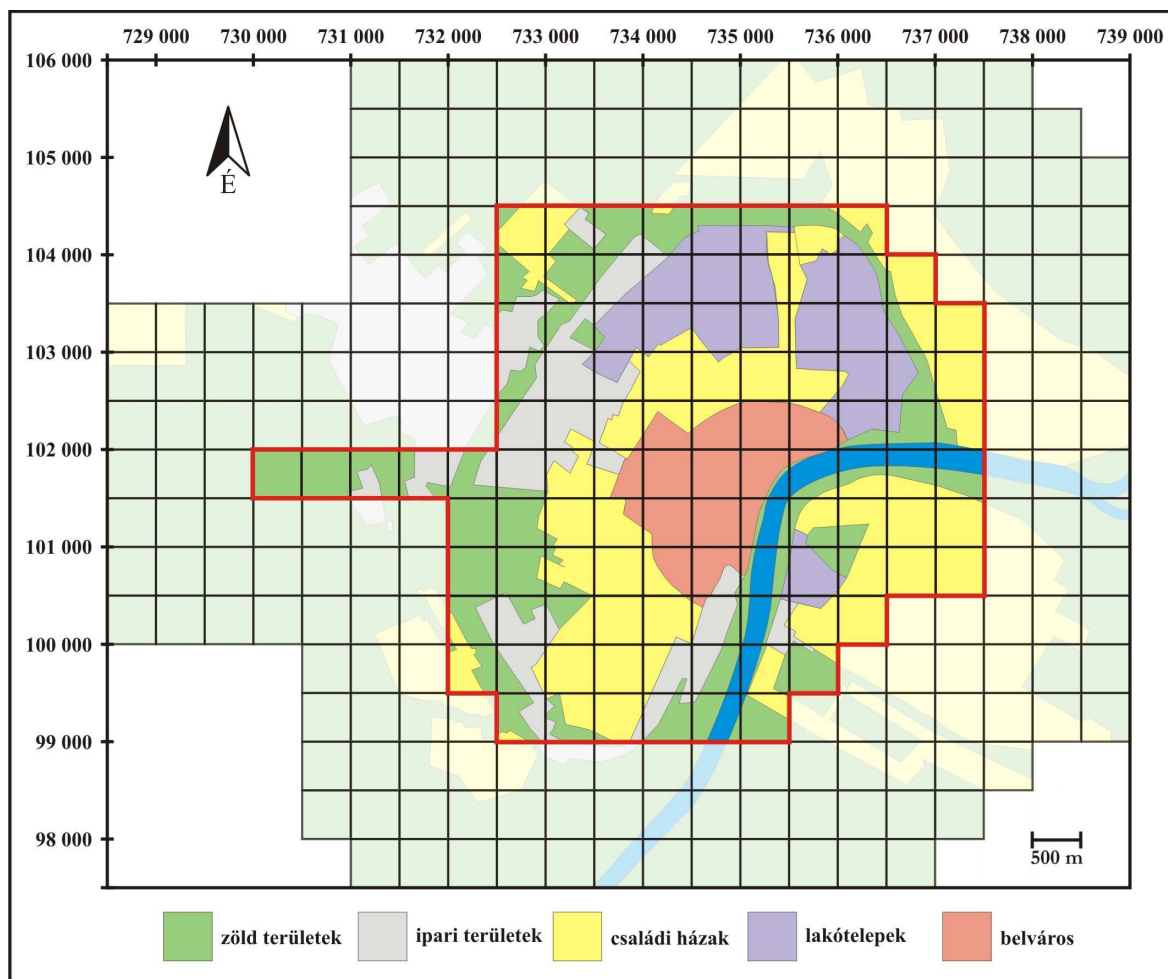
Szegedre és környékére határozottan a meleg–száraz klíma jellemző, vagyis a nyár meleg, aszályra hajlamos, bőséges a napfénytartam, aránylag kicsi a páratartalom és a felhőzet, télen kevés a hócsapadék, emiatt vékony a hótakaró (*Péczely*, 1979).

A globálsugárzás havi és évi összegei az országos átlagnak megfelelőnek, a napfénytartam országosan kiemelkedőnek, míg a felhőzet mennyisége éves szinten az ország többi területeihez mérten kevésnek mondható. A szélirányok relatív gyakorisága alapján elsősorban északi és északnyugati szelek az uralkodóak, azonban a déli szél is nagy gyakorisággal jellemezhető. A lehullott csapadék mennyisége sokévi átlagban 497 mm, azonban az elmúlt években többször is alulmúlta ezt az értéket, ennek megfelelően az aszályra hajlamos területek közé soroljuk.

Szeged DK-Magyarország legnagyobb városa (lakóinak száma jelenleg 170 000 fő, de a nappali népesség meghaladja a 185 000 főt), fontos oktatási, kulturális és kereskedelmi központ. A településen átfolyó Tisza a várost két részre osztja. Szeged közigazgatási területe hivatalosan 281 km² (melynek nagyobbik hányada a Tisza jobb partján helyezkedik el), ebből azonban az igazán városi és elővárosi területek csak kb. 25–30 km²-t foglalnak el és főleg a – lehetséges árvíz elleni védelemként szolgáló – körtöltésen belül helyezkednek el, így a vizsgálatok is ezekre a városrészekre koncentrálnak.

A város – 19. század végi újjáépítéséből adódó – szerkezeti sajátosságait a Tiszára, mint tengelyre támaszkodó sugárutas-körutas rendszer adja. A városi területhasználat jelentősen módosult (főleg 1968–78, s kisebb mértékben 1978–88 között) a peremvárosi területeken létesült hatalmas méretű panelépítésű lakótelepek következtében. Létrehozásuk

sajátos szerkezeti tagoltságot visz a városi morfortextúrába azzal, hogy a néhányemeletes házakkal sűrűn beépített centrum és a viszonylag új lakótelepek nagy vertikális kiterjedésű, de lazább elhelyezésű épületei között megmaradt egy alacsonyszintű, sok zöldterülettel és kerttel rendelkező vegyes városrész. Korábban ez a terület fokozatos átmenetet jelentett a sűrűn beépített városmag és a beépítetlen szabad területek között.



4.1.3. ábra A vizsgált terület (piros vonallal határolva) és Szeged területhasználati típusai az alkalmazott rácshálózattal

Szegeden jelenleg a következő területhasználati típusok különíthetők el (4.1.3. ábra):

- Viszonylag sűrűn és egységesen beépített (2–4 emeletes) belváros, ahol a többségében keskeny utcákat magas házfalak zárják közre.
- Nagy panelépítésű lakótelepek, ahol az igen magas (4–10 emeletes), uniformizált épületek viszonylag ritkán helyezkednek el, és köztük nagy kiterjedésű, nyílt zöldterületek találhatók.
- Ipari és raktárházak körzetek, ahol a nagy alapterületű és kis magasságú csarnokok a jellemzőek, melyek között a felszín többnyire szilárd burkolattal van ellátva.

- Családi házas részek, ahol a kis alapterületű, egy-két szintes házak között kiterjedt nyílt területek találhatók, főként kerti növényekkel, fákkal.

- A városi parkok, a Tisza partján található galériaerdők és a külterületek már jellemzően növényzettel fedettek, épület vagy szilárd burkolat ezeknek a területeknek csak kis százalékán fordul elő.

Szeged rendkívül kedvező feltételeket kínál a városklíma kutatásokhoz a már tárgyalt fekvésének, domborzati viszonyainak, méretének és szerkezetének köszönhetően, hiszen a városi felszín klímamódosító hatásainak kifejlődését nem befolyásolják egyéb földrajzi tényezők (pl. orográfia), így e hatások tisztán megfigyelhetők és tanulmányozhatók.

4.1.2. Debrecen földrajzi, éghajlati és szerkezeti adottságai

A város az Alföld közepétől kissé északkeletre fekszik (északi szélesség $47^{\circ}33'$, keleti hosszúság $21^{\circ}37'$). Az Alföld legnagyobb folyója, a Tisza 60–70 km-re folyik a várostól. A tökéletes síkság közepes tengerszint feletti magassága 108,5 méter, Debrecené 123 (110 és 125 m között „ingadozik”). Debrecen három egymástól sokban eltérő jellegű táj találkozásánál jött létre. Itt található a gazdag televényű hajdúsági lösztakaró (az ország egyik legjobb búza- és kukoricatermelő tája), a Nyírség homokbuckás, erdős-lápos vidékével és a Hortobágy folyó, illetve a Sárrétnek nevezett egykori mocsár vizenyős területeivel, mára szikes pusztáival.

A terület az ÉK-alföldi hordalékkúp peremi része volt, így a pannon táblára – mely a felszín alatt már 40–50 m-re is megtalálható – folyóvízi homok települt. A pleisztocén közepén megemelkedett, s a tájfejlődés folyamatában ezután már a szél játszott a főszerepet. A hordalékkúp-felszínen futóhomokformák is keletkeztek, de ezeket később a löszös üledékek betakarták. Ma löszös táblás-síkság, tájalkotó kőzetei a löszös homok és a homokos lösz. A vidék morfológiai képe nem nagyon változatos (*Frisnyák et al.*, 1988).

Egykori növény- és állatvilágát csak kisebb foltokban, reliktum területeken őrizte meg az Alföld, hiszen kultúrtájjá alakult. Hazánk első természetvédelmi területe az Alföldet egykor borító gyöngyvirágos tölgyesek maradáka a debreceni Nagyerdő lett 1939-ben. Debrecen egykori legelőjén, a hortobágyi pusztán, 1972-ben avatták hazánk első nemzeti parkját.

Megőrződtek az ősi Tisza árvizei öntözött táj maradvány mocsarai, de a vízi élőhelyeket az épített csatornák és halastavak gazdagítják. A mocsarakat övező rétek szinte észrevétlenül érintkeznek a szikes pusztával, melyet néhol eredeti ősi vagy telepített erdők tarkítanak. A különböző élőhelyek sajátos növény- és állatvilága, mely utóbbi kiemelkedően gazdag madárfajokban (*Justyák és Tar*, 1994).

Debrecenre és környékére a mérsékelt meleg–száraz klíma jellemző, vagyis a nyár mérsékelt meleg, aszályra hajlamos, bőséges a napfénytartam, aránylag kicsi a páratartalom és a felhőzet, télen kevés a hócsapadék, emiatt vékony a hótakaró (Péczeley, 1979).

A globálisugárzás havi és évi összegei az országos átlagnak megfelelőnek mondhatók. A város sokéves átlagban 1982 óra napsütést kap évente. Uralkodó széliránya északnyugati és délkeleti. Évi átlagos csapadékmennyisége 566 mm, évi középhőmérséklete 9,9 °C.

A 4.1.1. táblázat tartalmazza a két város 1961–1990-es klímanormáit, amiből megállapítható, hogy éghajlati szempontból lényegében azonosnak tekinthető a két környezet, még ha néhány klimatikus paraméterben kisebb eltérés figyelhető is meg.

4.1.1. táblázat Szeged és Debrecen klímanormái 1961–1990 között (CLINO, 1996)

Éghajlati paraméter	Szeged	Debrecen
Évi középhőmérséklet (°C)	10,4	9,9
Évi közepes ingás (°C)	22,6	22,9
Januári középhőmérséklet (°C)	-1,8	-2,6
Júliusi középhőmérséklet (°C)	20,8	20,3
Évi csapadékösszeg (mm)	497	566
Évi átlagos szélsősebesség (ms ⁻¹)	3,4	2,8
Napsütéses órák száma (óra)	2102	1982

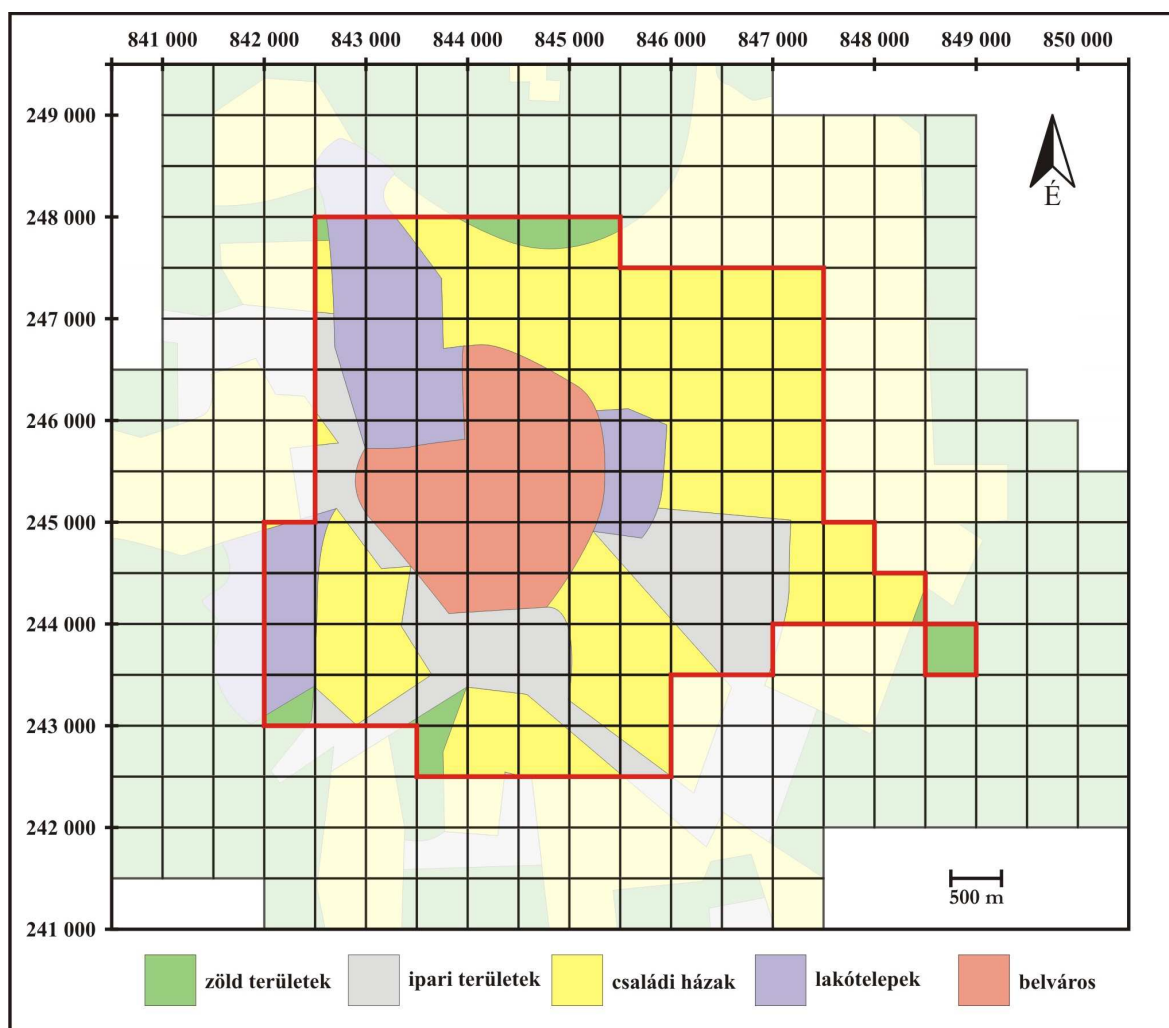
Debrecen 211 ezer lakosával az ország második legnagyobb városa, fontos oktatási, kulturális és kereskedelmi központ. Közigazgatási területe hivatalosan 461 km², ebből azonban az igazán városi és elővárosi területek csak kb. 30 km²-t foglalnak el.

Szerkezete sajátosan féloldalas, ami a hősziget területi kifejlődése szempontjából nem elhanyagolható. A város nyugati részén a lakótelepek magas panelházai a jellemzőek, míg a keleti felén a kertesi családi házak dominálnak. A városközpontban a néhányemeletes épületek a meghatározóak. A város déli részén nagy kiterjedésű ipari területek találhatók, ahol magas a talajfedés aránya. Északon a vizsgált területbe a Nagyerdei Park is beletartozik, ami az előző területek ellenpontja, hiszen itt a természetes felszínek a döntőek.

Ezek alapján Debrecennek a következő területhasználati típusai különíthetők el (4.1.4. ábra):

- Aránylag sűrűn és összefüggően beépített (3–4 emeletes) belváros, ahol a többségében keskeny utcákat magas házfalak zárják közre.
- A lakótelepek 4–14 emeletes panelházai magas uniformizált épületek, amelyek viszonylag ritkán helyezkednek el, és köztük nagy kiterjedésű, nyílt zöldterületek találhatók.
- Ipari és raktárházak körzetek, ahol a nagy alapterületű és kis magasságú csarnokok a jellemzőek, melyek között a felszín többnyire szilárd burkolattal van ellátva.

- Kertes családi házas részek, ahol a kis alapterületű, egy-két szintes házak között kiterjedt nyílt területek találhatók, főként kerti növényekkel, fákkal.
- A városi zöld területeken épület vagy szilárd burkolat csak kis részükön fordul elő. Ide tartozik a város északi részén elterülő a Nagyerdei Park is. Nagy kiterjedésű zöldfelületekkel rendelkező közintézmények, a strandfürdő, stadionok, állatkert, vidámpark, a Debreceni Egyetem és a klinikák találhatók a területén.

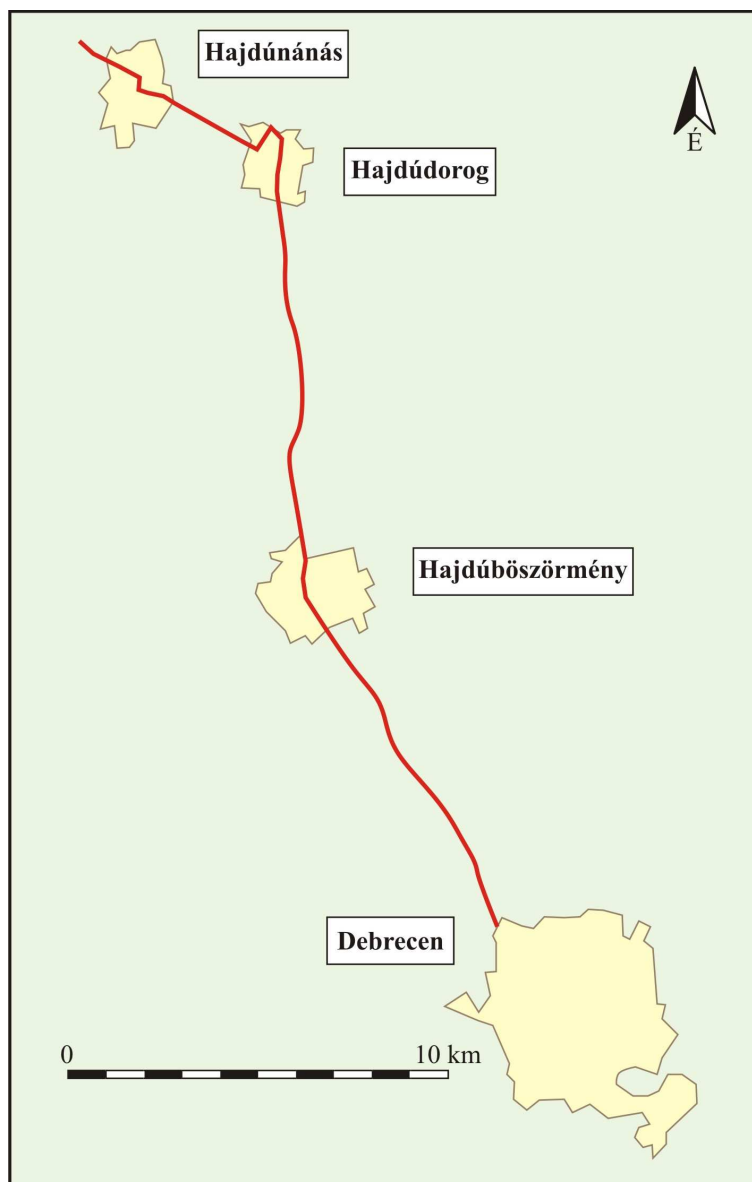


4.1.4. ábra A vizsgált terület (piros vonallal határolva) és Debrecen területhasználati típusai az alkalmazott rácshálózattal

Összességében elmondható, hogy Szeged és Debrecen környezete hasonló földrajzi és éghajlati adottságokkal rendelkezik, ami jól összehasonlíthatóvá teszi a két város által indukált városi hősziget területi eloszlását, valamint általános következtetések levonását is lehetővé teszi a hőmérsékleti többlet tulajdonságait illetően.

4.1.3. A hajdúsági városok földrajzi, éghajlati és szerkezeti adottságai

Hajdúböszörmény, Hajdúnánás és Hajdúdorog Debrecenhez közeli fekvésű (4.1.5. ábra), hasonló természetföldrajzi adottságokkal és szerkezettel rendelkező hajdúsági városok.



4.1.5. ábra A hajdúsági városok elhelyezkedése Debrecenhez képest

A hősziget kifejlődésének kedvez, hogy síksági fekvésűek és nincsen nagyobb vízfelület a közelükben. A hőmérsékleti mérés útvonala a Hajdúhát tengelyén halad, a Tóció-patak allúviumán átkelve a Dél-Nyírség nyugati peremig (Szegedi, 2005). A tengerszint feletti magasság 103 és 124 méter között változik az útvonal mentén. Hirtelen magasság-ingadozások a Tóció allúviumától eltekintve nincsenek benne.

Hajdúböszörmény, Hajdúnánás és Hajdúdorog jellegzetes hajdúvárosok, azok koncentrikus, körutas szerkezetével. A települések belső részét egy körút övezi, ami az egykori körárok helyén keletkezett, ezen belül nagyobb a beépítés sűrűsége. Ez a sugárirányú utcákkal rendelkező történelmi városmag. A körúton kívül, az egykori kertségek területén lazábban, falusias jelleggel az utóbbi néhány évtizedben beépített területek helyezkednek el. A szerkezet itt már nem koncentrikus, inkább halmaz- vagy sakktáblaszerű, közel merőleges utcákkal.

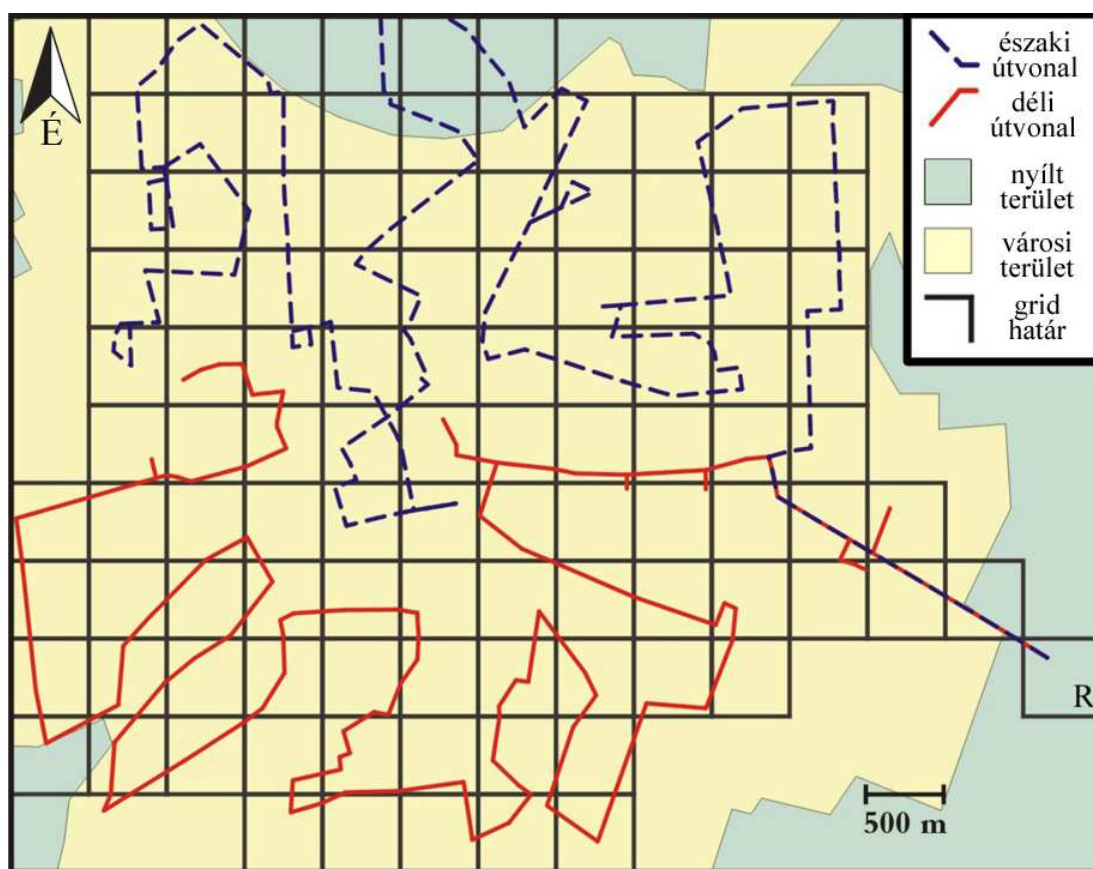
A körhöz közeli forma és az egyenletes beépítés szabályos alakot adhat a hőszigetnek. A mesterséges felszínborítottság aránya a települések beépített területén döntően 15–50% között mozog, de csak a városközpont környékén éri el az 50%-ot. A beépítés kisvárosi, a körúton kívül gyakran falusi jellegű, döntően földszintes és egyemeletes házakkal. Csak a városközpontban jelennek meg a legfeljebb 4 emeletes középületek és panelházak.

A vizsgált hajdúsági városok a jellemző alföldi településméret kategóriákat is jól reprezentálják: Hajdúböszörmény lakossága 32 000 fő (a belterületen 29 000 fő), Hajdúnánás lakossága 18 000 fő, Hajdúdorog lakossága 10 000 fő.

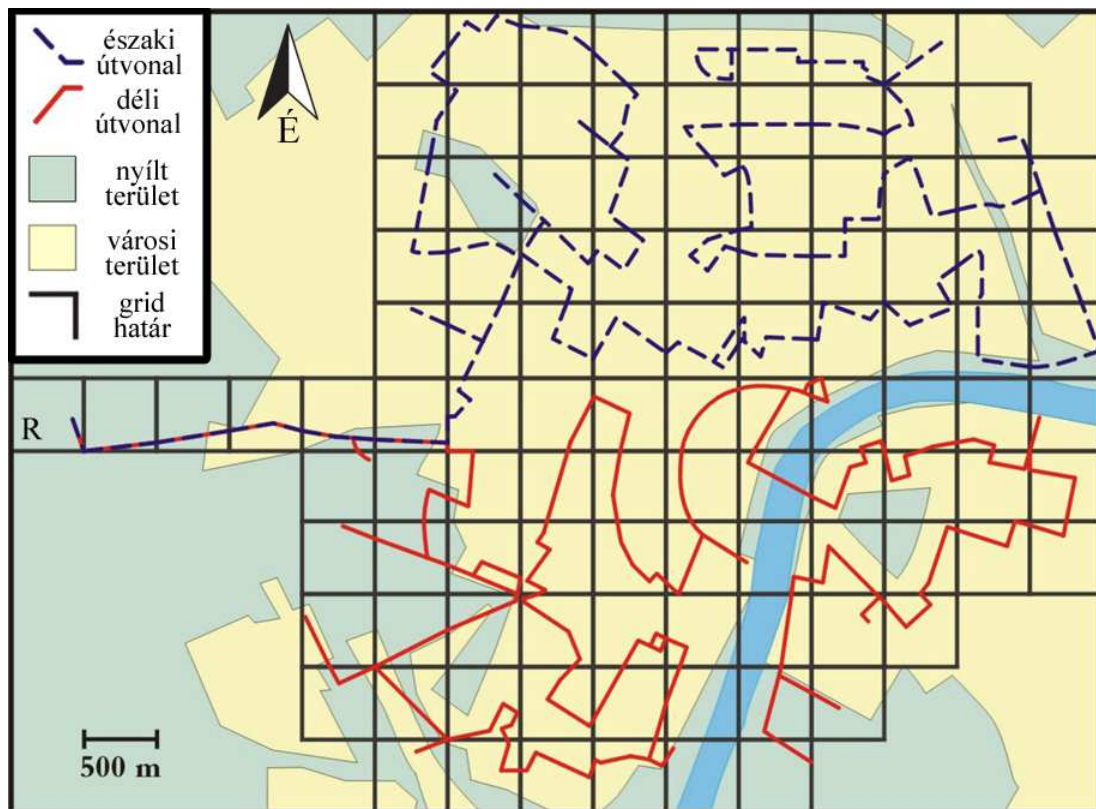
4.2. A modell függő változójának (ΔT) meghatározása

Mint a bevezetésben említettem vizsgálatom egy nagyobb, több éve folyó városklíma projekt egyik fejezete, így eredményeim erőteljesen támaszkodnak e projekt más eredményeire is. A következőkben bemutatott hőmérsékleti adatgyűjtés a nagyobb kutatás keretében zajlott, amelynek részese voltam magam is.

Szeged és Debrecen városklimatológiai kutatásai a városok belső területeire irányultak. Az összegyűjtendő adatok rendszerezése érdekében a vizsgált területet az Egységes Országos Térképrendszer (EOTR) 1:10.000 méretarányú földmérési-topográfiai térképein található kilométer-hálózati vonalak segítségével 500 m oldalhosszúságú négyzetekre, azaz cellákra osztottuk fel (4.2.1.a-b ábra). Ugyanilyen, 0,25 km² területű cellaméretet alkalmaztak más városklíma kutatási projektekben is (pl. *Jendritzky and Nübler*, 1981; *Park*, 1986), illetve hasonló cellaméretet lehet találni *Long et al.* (2003) és *Lindberg et al.* (2003) munkáiban is. Az ilyen módon meghatározott vizsgálati területet Szegeden 107 cella (26,75 km²) (*Unger et al.*, 1999), míg Debrecenben 105 cella (26,25 km²) jelenti (*Szegedi and Kircsi*, 2003b). Ezek lefedik a városok belvárosi, elővárosi övezeteit, valamint egy helyen ki is nyúlnak a városon kívüli területekre (4.2.1.a-b ábra). Ezek a külterületi cellák kontroll, illetve referenciaterületként szolgálnak a hőmérsékleti adatok gyűjtésekor.



4.2.1.a ábra A mérési hálózat, a referencia cella (R) és a mérési útvonalak Debrecenben



4.2.1.b ábra A mérési hálózat, a referencia cella (R) és a mérési útvonalak Szegeden

A maximális UHI intenzitás vizsgálatához szükséges hőmérsékleti adatokat a teljes mérési hálózatokban gyűjtöttük, meghatározott útvonalon haladó mérőautók segítségével. Kétszer egy éves mérési periódusban mértünk Szegeden (1999. márc. – 2000. febr. és 2002. ápr. – 2003. márc.) (Unger *et al.*, 2001a; Sümeghy and Unger, 2003a), illetve egyszer egy éves mérési periódusban Debrecenben (2002. ápr. – 2003. márc.) (Szegedi and Kircsi, 2003b). Az ilyen típusú mobil mérések igen elterjedtnek számítanak a városi klímaparaméterek vizsgálatában (pl. Oke and Fuggle, 1972; Moreno-Garcia, 1994; Eliasson, 1996; Yamashita, 1996; Voogt and Oke, 1997; Klysik and Fortuniak, 1999; Comrie, 2000; Santos *et al.*, 2003).

A megfelelő időbeli felbontás érdekében 7–10 naponta végeztük az egész vizsgált területre kiterjedő mérést, a kijelölt útvonalak mentén. A vizsgált területeken az UHI napi maximális kifejlődésének területi eloszlásáról a kellő számú, elegendően reprezentatív mintát a két mérési sorozatban végrehajtott 48, illetve 29 mérés biztosítja. Az utóbbi mérések a két városban azonos időpontban történtek. A kb. 3 óra időtartamú mérések kiterjedtek – az esőt kivéve – minden időjárási helyzetre, hasonlóan a Stewart (2000) által végzett mérésekre a kanadai Regina-ban. A területtel foglalkozó korábbi kutatások tapasztalatai alapján az adatgyűjtést az adott útvonal esetén úgy kellett időzíteni, hogy az UHI maximális kifejlődésének várható időpontja – naplemente után 4 órával (Boruzs és Nagy, 1999;

Oke, 1981) – előtt 1,5 órával kezdjük meg és utána 1,5 órával fejezzük be. A mért értékek átszámításnál felhasználtuk, hogy a hőmérséklet nagyjából lineárisan változott a mérés ideje alatt, a naplementét követő órákban. Ezt a korábbi kutatások, valamint az egyetemi és a külterületi mérőállomás adatsorainak tanulmányozása is alátámasztották.

A vizsgált terület mérete, illetve a mérési útvonalak hossza miatt a területet két szektorra kellett osztani, mert a teljes terület nem járható be a megfelelő időn belül. Az útvonalakat úgy kellett meghatározni, hogy a már említett 3 óra alatt bejárhatóak legyenek oda-vissza és mindegyik cellát érintsék legalább egyszer az oda és a visszaúton is. Így Szege-den (4.2.1.a ábra) az északi szektor mérete 54 cella ($13,5 \text{ km}^2$) lett, a déli szektor egy cellával kisebb ($13,25 \text{ km}^2$) (Unger et al., 1999). Debrecenben (4.2.1.b ábra) az északi szektor mérete 51 cella ($12,75 \text{ km}^2$), a déli szektor négy cellával több ($13,75 \text{ km}^2$) (Szegedi and Kircsi, 2003b).



4.2.2. ábra Az egyik mérőautó a rúdra szerelt hőmérsékleti szenzorral

Az észlelést végző mérőautók sugárvédelemmel ellátott automata hőmérsékleti szenzorral (LogIT HiTemp) voltak felszerelve (4.2.2. ábra), amely pontossága $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a gyári adatok alapján. Itt fontos megjegyezni, hogy ez a pontatlanság nem jelentkezik a nyert adatokban, hiszen különbségeket képzünk, vagyis relatív hőmérsékleti értékekről van szó, tehát az esetleges hiba szisztematikusnak tekinthető. A szenzorok az autók belsejében elhelyezett hordozható digitális LogIT SL adatgyűjtőkhöz (DCP Microdevelopments and SCC Research) voltak kapcsolva. A gyűjtők az adatokat 10 másodpercenként rögzítették, amely az autók átlagosan $20\text{--}30 \text{ kmh}^{-1}$ -s sebességénél azt jelentette, hogy a mérési pontok között átlagosan $55\text{--}83 \text{ m}$ volt a távolság a mérési útvonalak mentén. Természetesen a köz-

lekedési viszonyok miatt nem lehetett mindig egyenletes sebességgel haladni, de a mérések késő esti időpontjai miatt a kis forgalom nem bizonyult jelentős akadályozó tényezőnek. A feltétlenül szükséges megállások – pl. piros lámpa, sorompó – során rögzített adatokat értelemszerűen utólag töröltük az állományból. Az említett sebességtartomány pedig elegendő volt ahhoz, hogy megfelelő szellőzést biztosítson a szenzor számára, s így az minden pillanatban valóban a környező levegő hőmérsékletét rögzítse. A szenzort 1,45 m magasan és 0,60 m-rel a kocsik eleje előtt helyeztük el egy rúdon (4.2.2. *ábra*), hogy a motorból és a kipufogóból származó hő hatása ne befolyásolja a mért értékeket – hasonlóan Ripley *et al.* (1996) Kanadában, Saskatoonban alkalmazott eljárásához.

Az összegyűjtött hőmérsékleti értékeket cellánként átlagoltuk és átszámítottuk az adott mérési naphoz tartozó referenciaidőre, ami minden esetben a már említett, napnyugta utáni negyedik óra volt. Az abszolút UHI intenzitást, azaz a város és környezetének napi maximális hőmérsékleti különbségét (ΔT), a következőképpen értelmezhetjük cellánként:

$$\Delta T = T_{\text{cella}} - T_{\text{cella(R)}} \quad (^\circ\text{C})$$

ahol T_{cella} = az aktuális városi cella hőmérséklete; $T_{\text{cella(R)}}$ = a külterületi referencia cellának a hőmérséklete (4.2.1.a-b *ábra*).

A hajdúsági városokban a lehetőségekhez mérten É-D irányú keresztmetszeti mérőútvonalak mentén folytak a hőmérsékleti adatgyűjtések (Szegedi, 2005). Ezek a keresztmetszeti utak áthaladnak a település jellemző területhasználati típusain. Egy-egy beépítési típus jelent egy-egy mérési szakaszt. Továbbá minden városhoz tartozik két külterületi szakasz is, amihez, mint lokális 0 értékhez, meghatározható az adott településen a hősziget-intenzitás.

A mérések ugyanolyan mobil technikával folytak, mint Szegeden és Debrecenben, és ugyanúgy naplemente után 3–5 órával a hősziget maximális kifejlődésének várható időpontjában történtek. Egy mérőautó haladt végig az útvonalon oda (4.1.5. *ábra*), és a szakaszok fordított sorrendjében visszafelé (lásd 5.3.1., 5.3.2., 5.3.3. *ábra*). A lineáris hőmérsékletváltozás miatt ez lehetővé tette, hogy az oda és visszaúton mért eredmények átlagolása útján azonos időpontra, a mérés középidejére vonatkozó, így összehasonlítható eredmények szülessenek.

A mérések 2003 szeptemberétől 2005 januárjáig tartottak a hónapok első és harmadik dekádjának közepén, hogy lehetőség szerint mindenfajta időjárási helyzet (az eső kivételével) reprezentálva legyen. 34 mérésből 24 esetben sikerült értékelhető hőszigetet mérni.

4.3. A modell független változóinak meghatározása

A hősziget intenzitásának és területi eloszlásának közelítésekor felhasznált független változók a cellákhoz tartozó beépítettségi értékek, a belőlük származtatott további beépítettségi mutatók és a város szélétől mért távolságok.

A városi felszín sajátosságait egyszerűen, szemléletesen jellemzi az ún. beépítettségi arány (B vagy B_0), amely jelen dolgozatban egy adott cellára vonatkozóan a mesterséges fedett területek (pl. utak, járdák, tetők, parkolók, egyéb burkolt felületek) %-os arányát jelenti az adott cella teljes területéhez viszonyítva. Ez az a fedettség, amely tipikusan jellemző a városi környezetre, ugyanis nagyrészt vízátnemeresztő felszínt jelent, ellentétben a természetes környezetek nagyrészt növényzettel fedett és jó vízáteresztő felszíneire. Mindez összességében egy más klímát eredményez e módosított területeken (lásd 2.2. fejezet), ezért feltételezéseim szerint szoros a kapcsolat a ΔT nagysága, valamint a szűkebb és tágabb környezet fedettségének mértéke között.

4.3.1. Felszínparaméterek

4.3.1.1. Beépítettség

A kívánt paraméter (B) előállításához a legmegbízhatóbb és egyúttal a legkevésbé időigényes eljárás a térinformatika. A földrajzi információs rendszer (angolul: Geographical Information System – GIS) földrajzi adatok elemzésére kidolgozott speciális információs rendszer. Egyetlen rendszerbe integrálja a térbeli és a leíró információkat, valamint lehetővé teszi ezek kezelését, feldolgozását, elemzését, modellezését és megjelenítését. A pontos, hiteles és objektív adatszerzés legkönnyebben a távérzékelési, fotogrammetriai eszközökkel oldható meg.

A távérzékelés alatt olyan adatnyerési eljárásokat értünk, melyek az adatokat a vizsgált objektummal létrehozott közvetlen, fizikai kapcsolat nélkül produkálják. Ha a térbeli adatnyerés oldaláról vizsgáljuk a kérdést, a fotogrammetria mindenben megfelel a távérzékelés betűszerinti értelmezésének. Mégis a tényleges szóhasználat alapvetően két kritériumhoz kapcsolja a távérzékelés terminust: ugyanazt a jelenséget kettő vagy több tartományban mérjük, és/vagy mesterséges holdról hajtjuk végre az észlelést. Ez tehát azt jelenti, hogy ha a repülőgépen multispektrális felvételeket készítünk, akkor légi-távérzékelésről beszélünk, ha űreszközzel (mesterséges hold, űrállomás, űrsikló) készítjük a felvételeket függetlenül attól, hogy egy vagy több hullám tartományban, a módszer neve űrtávérzékelés.

Az űrtávérzékelés legfontosabb jellemzője, hogy nagy területről hatalmas adattömeget tud automatikus rendszerben a Földre továbbítani. Az érzékelő műholdak pályaelemeiktől is függő gyakorisággal letapogatják a Föld felületét, s az ugyanarra a területre vonatkozó

ismételt felvételek meglelte megteremti a multitemporális analízis lehetőségét. A másik fontos jellemző, hogy a legtöbb űrtávérzékelő eszköz lehetőséget biztosít a multispektrális felvételek készítésére, melyek segítségével kisebb-nagyobb megbízhatósággal a felszíni alakzatok bizonyos jellemzők egyezése alapján osztályokba sorolhatók. A létrejött osztályok tematikus fedvényként átvihetők a GIS-be.

Míg a légifényképezés rendszerint csak a földfelszín által visszavert, illetve a felszín saját sugárzását felhasználva hoz létre felvételeket (ez az úgy nevezett passzív letapogatás), addig sok távérzékelő űreszköz a saját maga által kibocsátott sugárzás segítségével is képes a földfelszín letapogatására. Ezt a módszert aktív letapogatásnak, az eredményül kapott képeket radar képeknek nevezik. A radaros módszereknek az a nagy előnye, hogy olyan hullámhosszakat használnak, melyeket a felhőzet kevésbé nyel el, és emellett függetlenek a felszín megvilágítottságától, azaz a felvételek minősége nem függ az időjárástól és a napszaktól (Sárközy, 2008).

A távérzékelés tehát – a terepi felmérésekhez viszonyítva – olcsó adatgyűjtési és feldolgozási megoldásokat jelent, magában hordozza az adatfelújítás, a naprakészen tartás egyszerű lehetőségét.

Kutatásomhoz Landsat műholdfelvételeket használtam fel, amelyeket a Landsat 7 műhold készített. Tulajdonságai révén az általa szolgáltatott adatok felhasználhatók a globális változások tanulmányozására, a felszínborítás változásának nyomon követésében, nagy kiterjedésű területek térképezésében. Landsat 7 műhold 8 spektrális sávban érzékel, amelyek tulajdonságait a 4.3.1. táblázat foglalja össze.

4.3.1. táblázat Landsat 7 műhold spektrális sávjainak jellemzői (Csató, 2000)

Spektrális sáv	Felbontás	Vizsgálható jelenségek
450 – 530 nm	30 m/pixel	víztestek
520 – 600 nm	30 m/pixel	növényzeti típusok
630 – 690 nm	30 m/pixel	növényfajták
760 – 900 nm	30 m/pixel	biomassza-tartalom, talajnedvesség
1550 – 1750 nm	30 m/pixel	talaj, hó-felhő elkülönítés
10400 – 12500 nm	60 m/pixel	növénybetegségek, hőkibocsátás
2080 – 2350 nm	30 m/pixel	ásványok, kőzetek
520 – 900 nm	15 m/pixel	térképezés

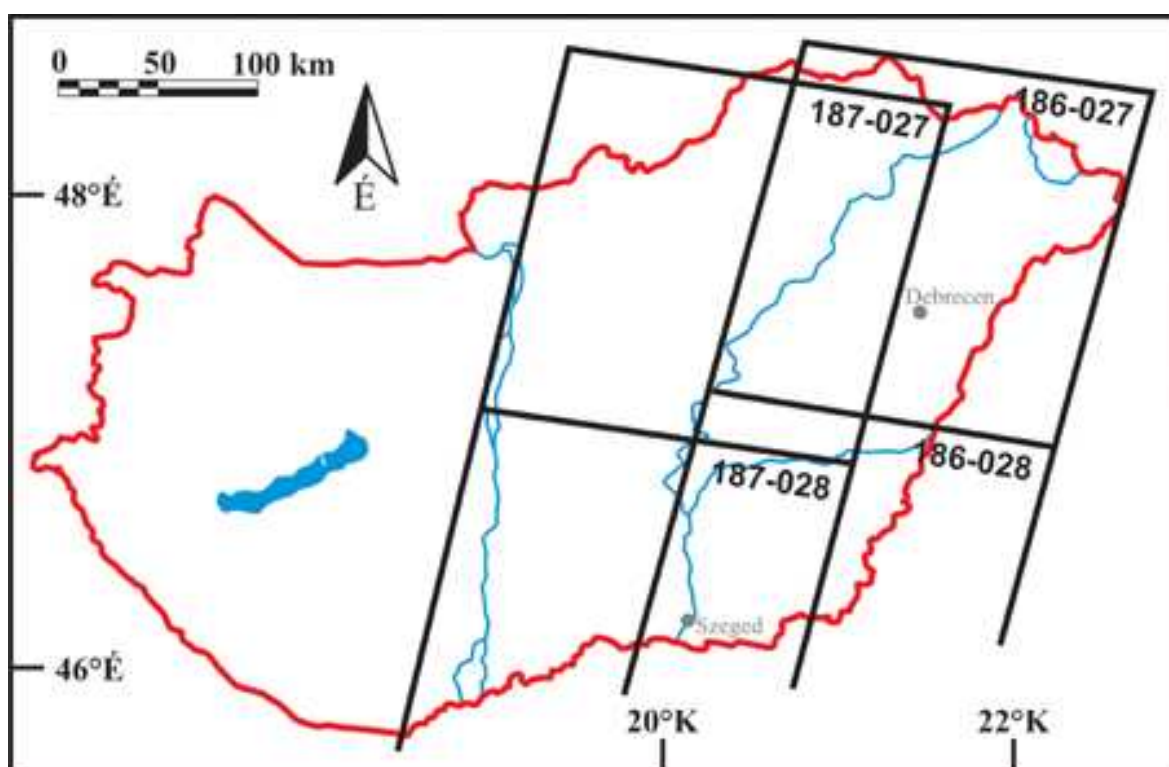
A jelenleg működő Landsat 7 műhold technikai jellemzői a következők:

- fellövés ideje: 1999. 04. 15.
- pályamagasság: 705,3 km
- pályatípus: kör alakú, napszinkron
- egy keringés ideje: 98,8 perc (14/nap)

- egyenlítői áthaladás: 10:00
- visszatérési idő: 16 nap az Egyenlítőnél, 8 nap 60° szélességeken
- inklináció: 98,2°
- terület: 185*185 km

A Landsat műholdfelvételeket a <http://glovis.usgs.gov> oldalról töltöttem le, ahol bárki ingyenesen hozzáférhet ezekhez az adatokhoz. Léteznek a Landsat műholdképeknél jobb felbontású űrfelvételek (pl. az IKONOS vagy a Quickbird), de ezek ára viszonylag magas. Így az ingyenes Landsat képek beszerzésével (és megfelelő háttérismeretekkel rendelkezve) bárki által követhető a módszerem, és ezáltal meghatározható bármely alföldi település hőszigetének térbeli szerkezete.

A vizsgálatomhoz használt 187 027-es és 187 028-as műholdfelvételek, tehát az Alföld nyugati felét lefedők 2000. augusztus 20-án készültek, míg az Alföld keleti részét lefedők a 186 027-es és a 186 028-as számúak 2000. szeptember 30-án (4.3.1. ábra).



4.3.1. ábra Az azonosítóval jelzett felhasznált Landsat műholdfelvételek lefedettsége

A műholdképeket az Egységes Országos Vetületi (EOV) rendszerbe kellett transzformálni. A transzformálás alapja az 1:100 000 méretarányú EOTR szelvény volt. A feldolgozás a „kép a térképhez” módszerrel történt, vagyis a nyers digitális műholdképek a vetületi rendszerben lévő térképek koordinátái alapján lettek korrigálva. A transzformáció során szükség van felszíni kontrollpontokra, amelyek mind a felvételeken, mind a neki megfelelő

térképeken jól azonosíthatók, pl. útkereszteződések, épületek. A geokorrektó folyamatán ezen, ismert koordinátájú illesztőpontok alapján transzformáljuk át a teljes képeket az EOV vetületi rendszerbe.

Az RMS hiba (RMS - root mean square) megadja a pozícionálási pontatlanságot minden illesztőpontban a kiinduló kép mértékegységében, ami esetemben pixel egység volt. Az RMS-t 0,5-es érték alatt fogadtam el – többnyire 0,2–0,3 volt az átlag RMS a felvételeken –, és a kezdetben elsőrendű transzformációt ezen küszöb elérése után emeltem másodrendűre. Az adatvesztés elkerülése érdekében a „legközelebbi szomszéd” újramintavételezési módszert alkalmaztam.

A műholdfelvételek transzformálása az ERDAS szoftver segítségével történt. Ez egy erőforrás-kutatásra kifejlesztett programcsomag, amely nagy adatmennyiséget jelentő rasteres állományok beolvasását, konvertálását és feldolgozását teszi lehetővé képpiramis-elvű adattárolással és kezeléssel (ERDAS, 2000). Az ERDAS modulokból álló, bővíthető és fejleszthető szoftverkörnyezet a kor színvonalának megfelelő grafikus felhasználói felülettel, mely legördülő menükből, ikonokból és párbeszéd-ablakokból áll.

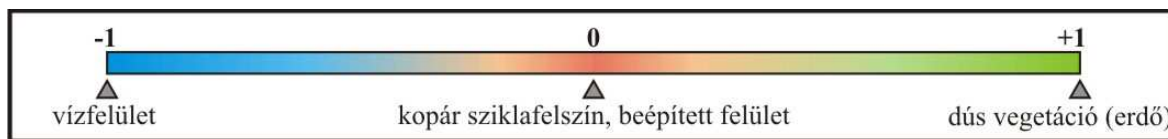
A geokorrektót követően az Normalizált Vegetációs Index (Normalised Difference Vegetation Index – NDVI) kiértékelése vált szükségessé. Vegetációs indexeknek nevezzük azokat a matematikai kifejezéseket, melyekben a látható fény tartományába eső sáv (0,58–0,68 μm) és a közel infravörös sáv (0,73–1,1 μm) segítségével fejezzük ki a vegetáció jelenlétét és állapotát (Lillesand and Kiefer, 1987).

A spektrális visszaverődési görbék tanulmányozása alapján megállapítható, hogy a növényzet kis mértékben veri vissza a látható fény tartományába eső sugarakat, ugyanakkor fejlettségével, klorofill tartalmával arányosan erősödik a visszaverődés a közel infravörös sávban. Ha kimutatjuk a látható fény tartományába eső és a közel infravörös sávban mért értékek közötti különbséget, meghatározhatjuk a vegetáció jelenlétét és állapotát. Minél nagyobb a különbség, annál fejlettebb a növényzet. A gyakorlat bebizonyította, hogy jobb az egyszerű különbség helyett a normalizált különbséget használni, mivel ez kiküszöböli a különböző megvilágításból, lejtésből, kitettségéből adódó eltéréseket, így alkalmas a globális vegetációs monitoringra. Az ERDAS Imagine modulja beépített NDVI számítást tartalmaz. Az index értékeit a pixelek különböző hullámhossz tartományú reflektancia értékeiből a következő egyenlet adja (Lillesand and Kiefer, 1987):

$$\text{NDVI} = (\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R})$$

ahol IR = a pixel reflektancia értéke a közel infravörös és R = a pixel reflektancia értéke a látható fény tartományába eső sávban. Az NDVI értéke mindig -1 és +1 között változik a felszínborítottság jellegének megfelelően (4.3.2. ábra). A felhő, a víz és a hó magas látható fény és alacsonyabb közel infravörös visszaverése miatt negatív vegetációs indexű. A ko-

pár sziklafelszín, aszfalt burkolat vagy talajfelszín esetén az érték 0 körül mozog, mert itt közel azonos az infravörös és a látható fény reflektanciája. Ha füves vegetáció van a területen, akkor kb. 0,2–0,5 az érték, ha erdős vegetáció, akkor 1 felé közelít (Mucsi, 2004).



4.3.2. ábra Az NDVI értékekhez tartozó felületek

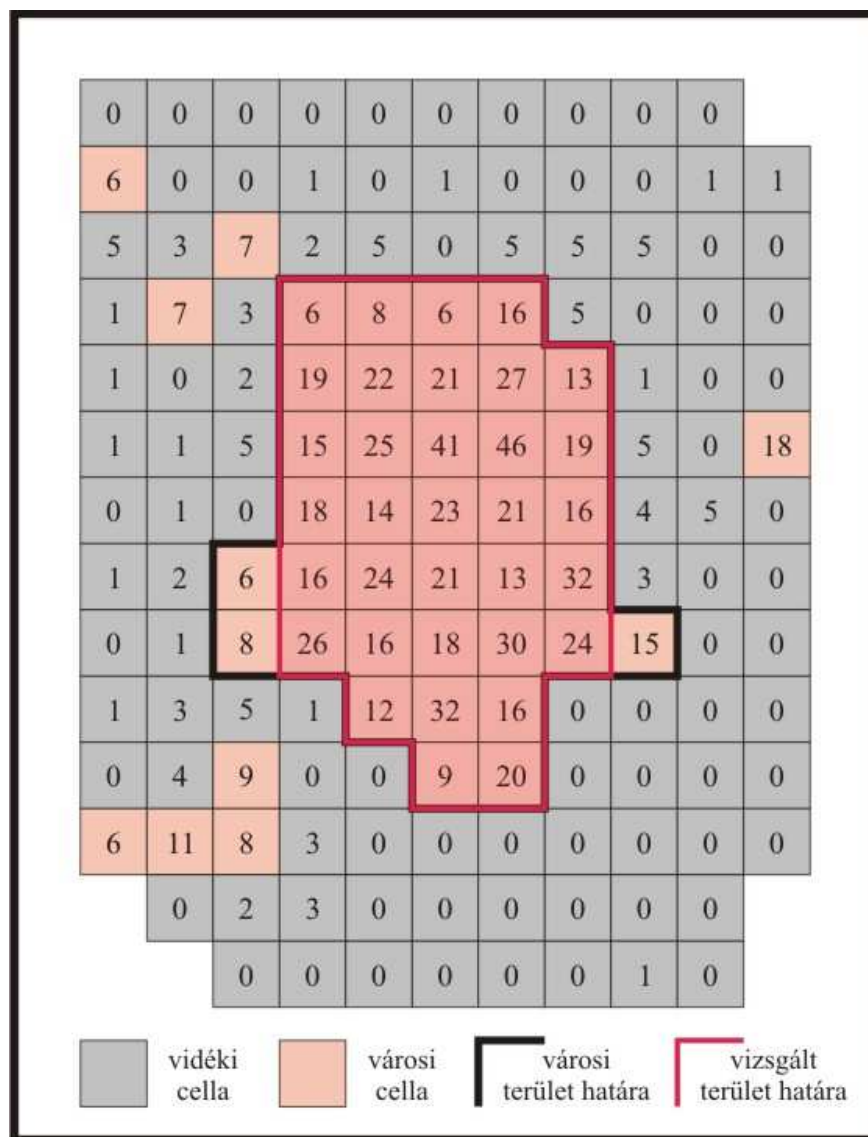
A kiértékelés fontos momentuma az NDVI értékek alapján a beépített felszín intervallumhatárainak megállapítása. Ahhoz, hogy minél helyesebb eredményhez jussak, bevontam a meghatározásba térképeket, digitális alaprajzokat. Minden területhasználati típusból kiválasztottam 3-3 cellát, és végül olyan intervallumhatárokat állapítottam meg, amelyek a legközelebbi értékeket adták az összes kiválasztott cellában.

Így tehát ennek a mutatónak segítségével meghatározható a beépített felszínnek (B), a víznek és a növényzetnek a vizsgált területen belül a cellákhoz tartozó százalékos aránya.

Minden városról egy kivágat készült, ami tartalmazza a beépített városi területet és ennek egy 1,5 km-es környezetét. A kivágat sarokpontjai az 500-zal osztható EOV koordinátákhoz igazodnak, így egyszerűen és pontosan illeszthetők egy 500 x 500 méteres hálózathoz (a hőmérséklet-méréseknél alkalmazott rács is ilyen elven épült fel Szegeden és Debrecenben). Erre a hálózatra azért volt szükség az ERDAS Imagine-ben, mert a kivágattal összeadva megkapjuk egy adott cellához tartozó mesterséges, illetve természetes pixelek számát. Mivel az 500 nem osztható pontosan 30-cal, ezért minden pixel ahhoz a cellához tartozik, ahová középpontja esik.

Az adatokat ezt követően az EXCEL táblázatkezelőben dolgoztam fel. Elsőként az adott cellákhoz tartozó beépítettségi értékeket (B) határoztam meg. A kopár szántóföldeket az ERDAS az NDVI értékeik alapján a beépített területekhez sorolta, ezeket térképek és műholdfelvételek alapján korrigálnom kellett.

A városi terület lehatárolása a B értékek segítségével történt. Alapként városi jellegű cellának tekintek minden 5% feletti beépítettségi értékkel rendelkező cellát. Viszont nem minden városi jellegű cella tartozik bele a vizsgált területbe, mert ezt úgy határoztam le, hogy a város kisebb kinyúlásait mellőztem, hogy egy egyszerűbb, kompaktabb formát kapjak. A 4.3.3. ábra szemlélteti a városi, illetve a vizsgált terület lehatárolását a beépítettségi értékek alapján. Azért választottam példaképpen Karcagot, mert lényegesen kisebb, mint Szeged vagy Debrecen, valamint a későbbi vizsgálatok során ez a település is szerephez jut (lásd 5.4. fejezet). A megnagyobbított, 1,5 km-rel bővített környezetre a további beépítettségi mutatók képzéséhez van szükség (lásd 4.3.1.4. fejezet).



4.3.3. ábra A városi, a vizsgált terület és az 1,5 km-es környezet lehatárolása Karcag példáján (a számok a cellák beépítettségi értékeit jelentik %-ban)

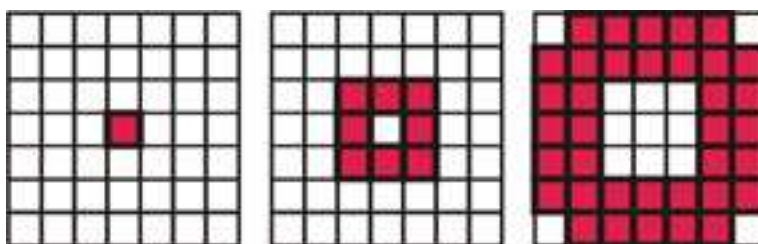
4.3.1.2. A további felszínparaméterek képzése

Fontos, hogy figyelembe vegyük egy adott cella környezetében lévő cellák beépítettségét is, hiszen a tágabb környezet befolyásolhatja az adott cella hőmérsékletét. A származtatott változók (koncentrikus területi kiterjesztés a cellák körül) meghatározhatók a beépítettségi mutatóból a következő módokon, hasonlóan a *Bottyán and Unger* (2003) és a *Bottyán et al.* (2005) által alkalmazott összefüggésekhez:

- B_0 (vagy B) paraméter = a cella beépítettségi értéke (%), ha $\Delta i^2 + \Delta j^2 = 0$
- B_1 paraméter = a cellák átlagolt beépítettségi értéke (%), ha $1 \leq \Delta i^2 + \Delta j^2 < 2^2$
- B_2 paraméter = a cellák átlagolt beépítettségi értéke (%), ha $2^2 \leq \Delta i^2 + \Delta j^2 < 4^2$

Itt i és j a cella indexszámait jelentik két dimenzióban, míg Δi és Δj a cella és a középonti cella indexszámainak különbsége. A 4.3.4. ábra szemlélteti, hogy mely cellák beépítettségi értékeinek figyelembe vételével épül fel a B_1 , B_2 paraméter. A változókból kapott zónák lefedik a teljes vizsgálati területet és azok 1,5 km széles környezetét a vizsgált településeken.

A B_1 és B_2 paraméterek esetében megvizsgáltam, mennyiben változna az eredmény, ha súlyoznám a cellákat az alapján, hogy középpontjuk milyen távol esik a központi cella középpontjától. A változás olyan kis mértékű volt, hogy nincs gyakorlati jelentősége, tehát nem érdemes ezt az egyszerű modellt bonyolítani vele (Balázs *et al.*, 2006).



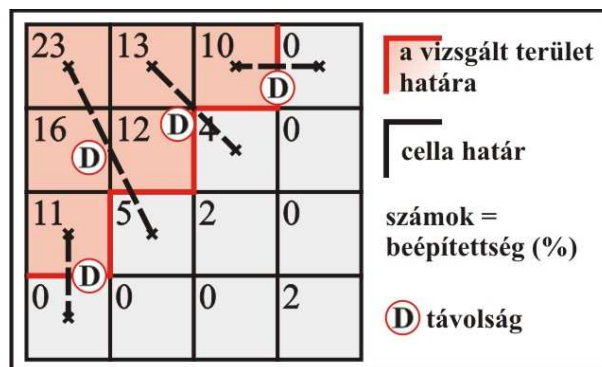
4.3.4. ábra A B_0 , B_1 és a B_2 paraméterek értékeinek meghatározásához számításba vett cellák

A cellák környezetének fontosságát szemlélteti a 4.3.5. ábra, ahol két, azonos B_0 értékkel rendelkező cellát emeltem ki (4.3.5. a ábra). Egyik – a későbbiekben szintén vizsgált – Hódmezővásárhely belvárosban, míg a másik a város szélén található. A közvetlen szomszédok átlagai (B_1) már jelentős mértékben eltérnek egymástól (4.3.5.b ábra), mivel a belvárosi cella környezetében magasabb beépítettségű területek fordulnak elő, így a cella B_1 értéke is magasabb lesz, mint az eredeti B_0 . A városperemi cella B_1 értékét vidéki jellegű cellák erősen mérséklék. Egyébként ezek a városszéli, viszonylag magas beépítettségű területek általában nagy burkolt felülettel rendelkező ipartelepek vagy bevásárlóközpontok. A vizsgált területen a cellák B_2 értékei közeledtek egymáshoz (4.3.5.c ábra), így a két kiválasztott cella különbsége is mérséklődött valamelyest. Ez a tágabb (és nagyszámú cellát figyelembe vevő) környezet érték-kiegyenlítő hatására utal, ezért feltehetően nem érdemes további tágabb környezeteket figyelembe venni. A legnagyobb B_2 -es érték 41, a legkisebb 9. A három paraméter közül a legnagyobb szórása a B_0 paraméternek, míg legkisebb a B_2 paraméternek van.

4.3.1.3. A város szélétől mért távolság

Fortuniak (2003) szerint a ΔT logaritmikusan függ a város szélétől mért távolságtól. Abból a feltételezéséből indult ki, hogy a városi népesség (P) nagysága nagyjából arányos a város területével, így ez az összefüggés megmagyarázza azt a logaritmikus kapcsolatot a populáció és a maximális UHI intenzitás között, amit Oke (1973) és Park (1986) is kimutatt. Unger et al. (2000) és Svensson et al. (2002) szintén felhívják a figyelmet a távolság és az UHI intenzitás közötti kapcsolatra. A távolságot, akár a város közepétől vagy szélétől számítjuk, tekinthetjük úgy, mint egy olyan paramétert, ami jellemezi egy terület (vagy pont) városon belüli elhelyezkedését. Ugyanis, ha veszünk egy-egy területet a külvárosban és a városközpontban, ahol közel azonos az épületek felépítése és sűrűsége, azt figyelhető meg, hogy a belvároshoz viszonyítva a külvárosban egy mérsékeltebb ΔT érték lép fel.

Jelen esetben a D paraméter az adott cella távolsága a város szélétől m-ben kifejezve, ha a cella a vizsgált területen belül van. Tehát azt a távolságot értem ez alatt, ami egy adott cella központja és a legközelebbi városon kívüli cella (tehát $B_0 \leq 5\%$) központja között van (4.3.6. ábra).



4.3.6. ábra A város szélétől mért távolság meghatározása
(a számok a cellák beépítettségi értékei %-ban)

4.3.2. Távolsággal kombinált felszínparaméterek

Ahhoz, hogy a távolság (D) és a fentebb említett felszínparaméterek (B_0 és ennek területi kiterjesztései, B_1 , B_2) együttes szerepét figyelembe lehessen venni, létrehoztam néhány új kombinált városi paramétert (B_0' , B_1' , B_2'), ahol a felszíni paraméterek a távolság természetes alapú logaritmusával vannak megszorozva (vagy súlyozva) cellánként (Balázs et al., 2008). Így ezek a kombinált paraméterek fognak szerepelni a modellben, mint az adott cella szűkebb és tágabb városi környezetét reprezentáló (független) változók:

- B_0' paraméter = $B_0 \cdot \ln D$,
- B_1' paraméter = $B_1 \cdot \ln D$,
- B_2' paraméter = $B_2 \cdot \ln D$.

A kapott paraméterek dimenziójának a 'm%' -nak kellene lennie a súlyozás miatt, de talán egyszerűbb és értelmesebb, ha dimenzió nélkülinek tekintjük.

4.4. Az éghajlati rendszer matematikai modellezésének módszerei

Az éghajlat egy bonyolult, nem-lineáris, turbulens rendszer, viselkedése spekulatív módon nem jellemezhető: egyedüli módszer a modellezés. Az éghajlati rendszer komponenseit több-kevesebb pontossággal ismerjük, s így azok modellezhetőek, valamint a közöttük levő kölcsönhatások számszerűsíthetők. Az éghajlati folyamatok modellezéséhez kétféle módszerrel közelíthetünk: dinamikus és statisztikai modellezéssel.

4.4.1. Dinamikus modellezés

A dinamikus modellek a rendszer időbeli viselkedését írják le, amelyek alapjául a légkör állapotát leíró légköri kormányzó egyenletek szolgálnak. Az ilyen típusú egyenleteknek nincs egyértelműen felírható megoldása, hanem bizonyos számítási módszerekkel lehet megfelelő pontossággal közelíteni a megoldásokhoz. Ezeknek a módszereknek a számítási igénye óriási, a világ legnagyobb kapacitású számítógépeit igényli.

A kormányzó egyenletek instabil, kaotikus mozgásokat írnak le. Így pontatlanságuk nem az egyenletek hibája, hiszen maga a légkör egy ilyen kaotikus rendszer. Ezért a légköri modellek is ennek megfelelően viselkednek. A kaotikusság a gyakorlatban annyit jelent, hogy bizonyos időtartamot átlépve már egy kis hibát tartalmazó kezdeti feltételrendszer sem szolgáltat használható információt a végeredményről.

Annak megértéséhez, hogy a kicsi hiba hogyan viselkedik a kaotikus rendszerben, tekintsük meg a következő példát: vegyünk egy globális előrejelző modellt, a benne szereplő több tízezer kezdeti időjárási értékekkel. Majd vegyünk egy másikat, ahol ebből csak egyetlen értéket változtatunk meg kis mértékben, például az egyik hőmérsékleti értéket 1 fokkal megnöveljük, ami igencsak lényegtelennek tűnő változtatás. A két modellt párhuzamosan futtatva eleinte azt láthatjuk, hogy a fél napra, egy napra szóló állapotok (azaz előrejelzések) szinte azonosak, majd 2–3 napnál már van egy kis eltérés. 10–15 nap között azonban teljesen kettéválik a két modell, a jelentéktelen kezdeti eltérésből kiindulva egészen eltérő eredményekre jutunk. Tehát a belőlük származtatott előrejelzésnek már semmi közük sincs egymáshoz. Így válik szét a valóság és az általunk előrejelzett időjárás egy bizonyos idő után. Márpedig a kezdeti értékek a valósághoz képest többé-kevésbé mindig eltérnek, hibával terheltek.

4.4.2. Statisztikai modellezés

A statisztikai modellezés esetén az éghajlati megfigyelések hosszabb időszakon (akár éven, évtizedeken) át összegyűjtött adatait dolgozzuk fel, és ezekből tudományos következtetéseket vonunk le. Az éghajlati megfigyelések számanyagának rendezése, az adatso-

rok objektív jellemzése, az adatok összefüggéseinek felderítése és tudományos igényű elemzése nélkülözhetlenné teszi az éghajlatban a valószínűségi számítási és matematikai-statisztikai módszerek alkalmazását.

A mért adatokból úgy is vonhatunk le következtetéseket, hogy nem ismerjük teljesen a rendszerben zajló fizikai kölcsönhatásokat. Kizárólag a mérések alapján matematikai kapcsolatot állapíthatunk meg a mért paraméterek, valamint a becsülni kívánt paraméter értékei között. A mért paraméterek (független változók) értékei nem határozzák meg egyértelműen a becsülni kívánt paraméter (függő változó) értékét, hanem véletlenszerűen ingadoznak egy legvalószínűbb érték körül. Az ilyen jellegű összefüggést sztochasztikus kapcsolatnak nevezzük (Péczely, 1979).

A sztochasztikus kapcsolatok felderítésére a szemléletes, de nem elég pontos grafikus elemzés mellett a korrelációs számítást szokás alkalmazni. A két változó közötti kapcsolat szorosságának kifejezésére a korrelációs együttható (r) szolgál. Értéke $+1$ és -1 között változhat, pozitív értékei a két változó közötti egyértelmű, negatív értékei pedig ellentétes értelmű kapcsolatra utalnak. Függvénykapcsolat esetén értéke $+1$ és -1 , ha pedig a két változó között összefüggés nincsen, akkor értéke 0 lesz. A korrelációs együttható a determinációs együttható négyzetgyöke.

A korrelációs együttható és a kapcsolatba hozható változók számtani közepének és szórásának ismeretében mód van arra, hogy a kiegyenlítő regressziós vonal egyenletét (vagy sztochasztikus függvényét) meghatározzuk. A regressziós vonal voltaképp az adott x -hez tartozó legvalószínűbb y értéket adja.

A közelítő sztochasztikus függvény lehet lineáris, másodrendű, exponenciális, logaritmikus stb. A legjobb illeszkedést a legkisebb négyzetek módszerével számolhatjuk ki. A lineáris regressziónál a pontok és az egyenes távolságát minimalizálja ez a módszer. A valóságban a legkisebb négyzetek módszere azt az egyenest keresi meg, amelyre igaz az, hogy ha a pontoknak az egyenestől mért távolságait négyzetre emeljük, majd a kapott számokat összegezzük, akkor ez az összeg a minimális lesz, tehát nincs olyan másik egyenes, ami esetében kisebb ilyen összeget kapnánk.

Jelen dolgozatban a hősziget intenzitás-eloszlási modell megalkotásakor többváltozós lineáris (beléptetési) regressziós eljárást alkalmazok. A többváltozós lineáris regressziófüggvényénél az eredményhatározót (Y) a magyarázó változók (X_1, X_2, \dots, X_m) és a véletlen változó (ε) lineáris kombinációja a parciális regressziós együtthatókkal ($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$) határozza meg ($Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon$). Adott mintából származó konkrét értékek esetén a legkisebb négyzetek módszerének kiterjesztésével nyert normál-egyenletek megoldásából kapjuk meg a regressziós együtthatók (paraméterek) becsült értékeit (Katona és Lengyel, 1999; Cohen et al., 2003).

A klimatológiai vizsgálatok során gyakran felmerül az a probléma, hogy valamely feltevés igaz voltát kell eldöntenünk. Az elemzéseknél leggyakrabban alkalmazott feltételezés

az, hogy különböző mérések matematikai statisztikai jellemzői (átlag, szórás, bizonyos események valószínűsége, eloszlása) között nincs eltérés. Ez az ún. null-hipotézis fogalma (Pécze, 1979).

Megfelelő statisztikai eloszlásfüggvények alkalmazásával mód van arra, hogy a null-hipotézis teljesedését valószínűségi alapon eldöntsük. Ha például a null-hipotézis teljesedési valószínűsége nagyon kicsiny, a hipotézist elvetjük és a tapasztalt eltérést jelentősnek, szignifikánsnak tekintjük. Azt a valószínűséget, amely túllépése esetén a null-hipotézist elvetjük, szignifikanciaszintnek nevezzük. Kijelölése voltaképpen konvenció kérdése, általánosan a 0,05, 0,01 vagy a 0,001 (tehát 5%, 1%, 0,1%) valószínűségeket szokás figyelembe venni.

Az egyik hipotézis ellenőrző eljárás a chí-négyzet próba, amely használható különböző eloszlások azonos vagy nem azonos voltának eldöntésére, minőségileg osztályozott megfigyelési sorok összehasonlítására. A másik a t-próba, amelyet különböző statisztikai minták számtani közepének összehasonlítására alkalmazunk.

A korrelációs számítás során nyert korrelációs együttható is úgy tekinthető, mint egy arra vonatkozó feltevés, hogy két változó között kapcsolat van. Az, hogy ez a konkrét számmal kifejezett kapcsolat reális-e, tehát igaz-e a feltevés, hogy a két változó kapcsolatban áll egymással, szintén feltevésvizsgálattal dönthető el. Null-hipotézisünk jelen esetben az, hogy a két változó között nincs kapcsolat, tehát a korrelációs együttható nulla. Ha a kiszámított korrelációs együttható abszolút értéke elég nagy, a null-hipotézis (nincs kapcsolat) kellő biztonsággal elvethető.

Az adatpárok számát ismerve, adott szignifikanciaszintekre meghatározhatjuk a korrelációs együttható azon abszolút értékét, amelynél nagyobb r esetén a null-hipotézis elvethető, tehát a korrelációs együtthatót reálisnak tekinthetjük.

5. EREDMÉNYEK

5.1. A városi hősziget és a felszínparaméterek területi eloszlásai

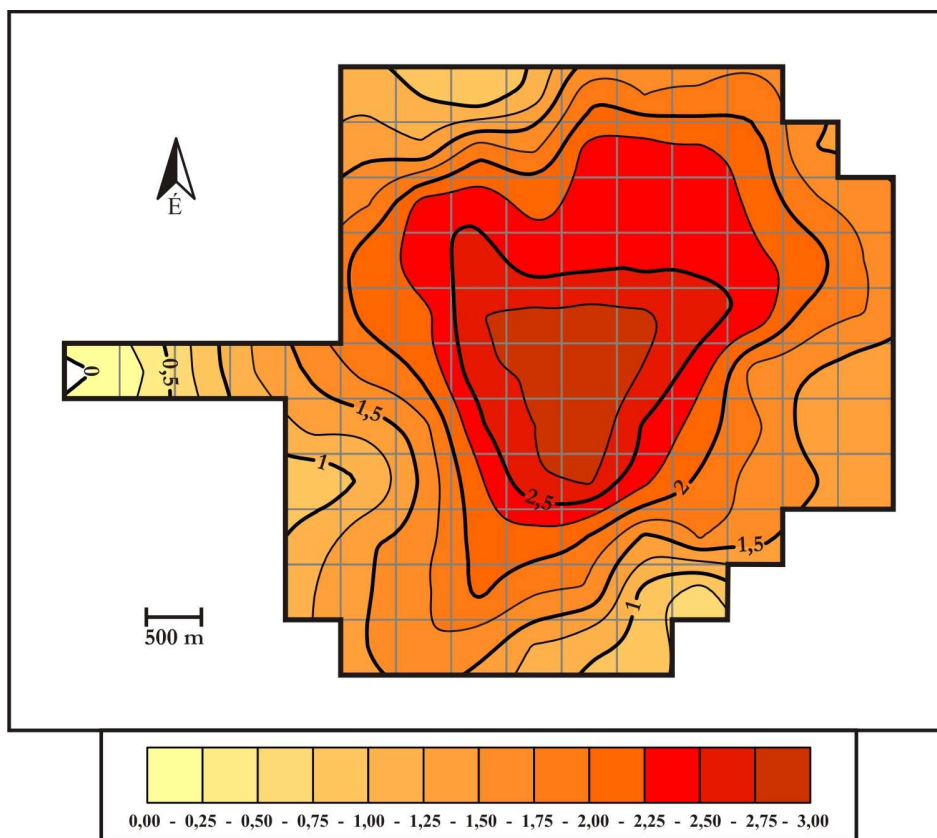
5.1.1. A városi hősziget átlagos területi szerkezete korábbi vizsgálatok eredményei alapján

Mint korábban említettem, a hőmérsékleti adatgyűjtés egy nagyobb projekt keretében zajlott, amelynek részese voltam magam is. Az 5.1.1. és 5.1.2. ábra a hősziget éves átlagos területi szerkezetét mutatják Szegeden, illetve Debrecenben. Az ábrák a Surfer programban készültek standard Kriging módszer és lineáris variogram modell segítségével. Az alkalmazott interpolációs technika – hiszen nem gyorsan változó, hanem térben folytonos mezőről van szó – széles körben használt geostatisztikai eljárás (*Chiles and Delfiner, 1999; Emery, 2006*). A vizuális megjelenítés mellett a módszer előnye az, hogy megpróbálja visszaadni az alapadatokban rejlő tendenciát, így egy-egy cellán akár több izovonal is átfuthat.

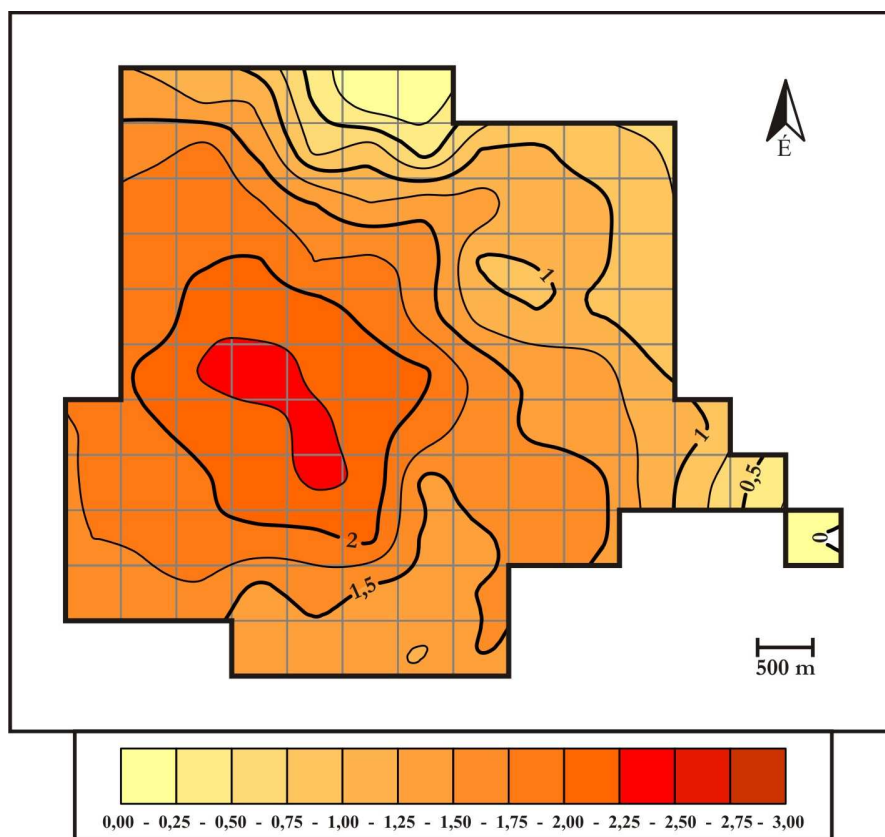
Szegeden a hősziget alakja meglehetősen koncentrikusnak mondható, míg Debrecenben nem ölt ilyen szép szabályos formát. A különbséget a városok szerkezetében kell keresni. Szeged szerkezeti sajátosságait a Tiszára, mint tengelyre támaszkodó sugárutaskörutas rendszer adja. Debrecen szerkezete sajátosan féloldalas, mert a város nyugati részén a lakótelepek jellemzőek, míg a keleti felén a kertes családi házak dominálnak.

Szegeden a mért éves átlagos maximális UHI intenzitás $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, Debrecenben pedig $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Az abszolút maximális hősziget-intenzitás Szegeden megközelíti a $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot ($6,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) (*Sümeghy and Unger, 2003a*), míg Debrecenben a $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot ($5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) (*Szegedi and Kircsi, 2003b*). Szegeden a legnagyobb hőmérséklet különbséget a város és a környezete között egy kora tavaszi napon mértük (2003. márc. 24.), míg Debrecenben a nyár derekán (2002. júl. 15.).

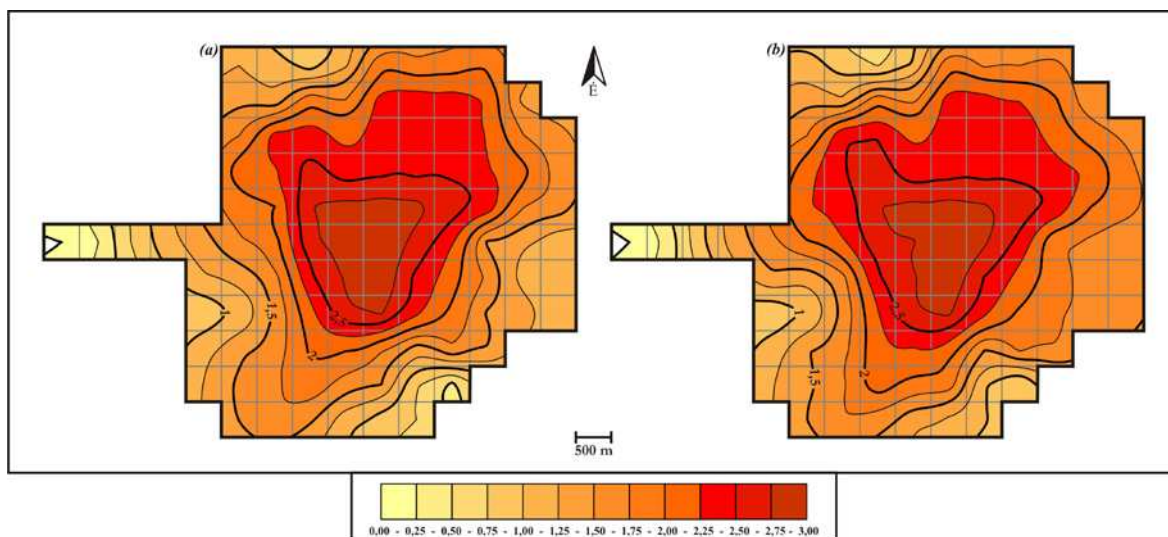
Az éven belüli részydőszakokat tekintve, valamelyest különbözik a fűtési (október 16. – április 15.) és nem-fűtési (április 16. – október 15.) időszakra vonatkozó ΔT eloszlása (5.1.3. és 5.1.4. ábra). Noha ezen időszakok nem esnek vizsgálatom tárgyába, a különbséggel kapcsolatban annyit azért meg kell említeni, hogy bár az antropogén hőtermelés a fűtési időszakban jóval hangsúlyosabb, a természetes kialakító tényezők (pl. napsugárzás, szél, felhőzet) eltérő hatása miatt a hősziget csak szerkezetében hasonlít a melegebb időszak szerkezetére az intenzitása alulmúlja azt (nem fűtési szezonban Szegeden $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, Debrecenben $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; fűtési szezonban Szegeden $2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, Debrecenben $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$) (*Sümeghy and Unger, 2003a; Szegedi and Kircsi, 2003b*).



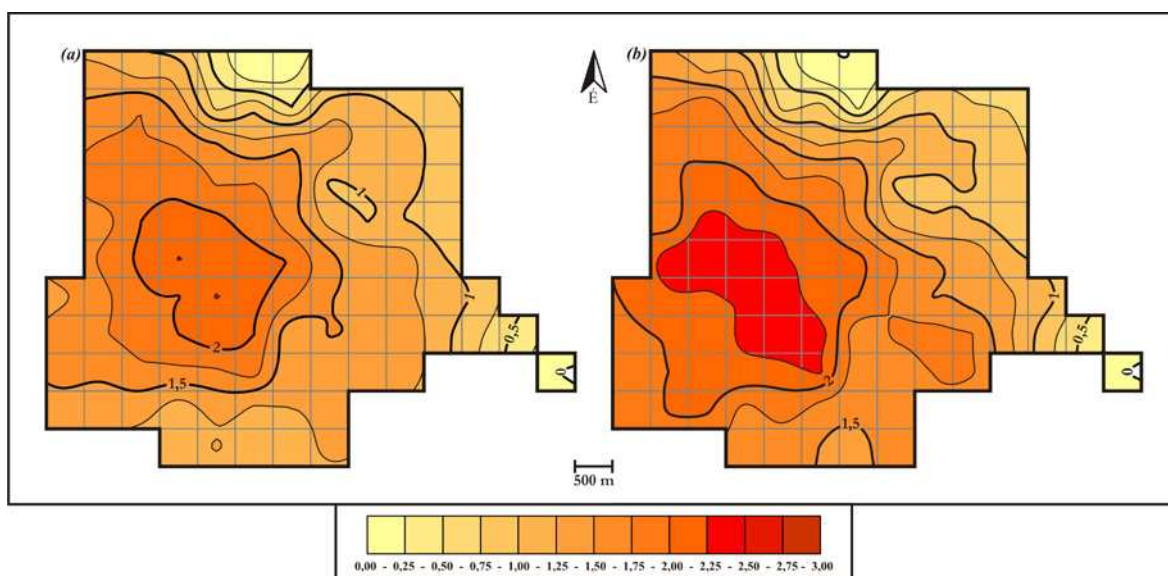
5.1.1. ábra Az UHI intenzitás (°C) átlagos területi szerkezete Szegeden (2002–2003)



5.1.2. ábra Az UHI intenzitás (°C) átlagos területi szerkezete Debrecenben (2002–2003)



5.1.3. ábra Az UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) átlagos területi szerkezete fűtési (a) és nem-fűtési (b) időszakra vonatkozóan Szegeden (2002–2003)



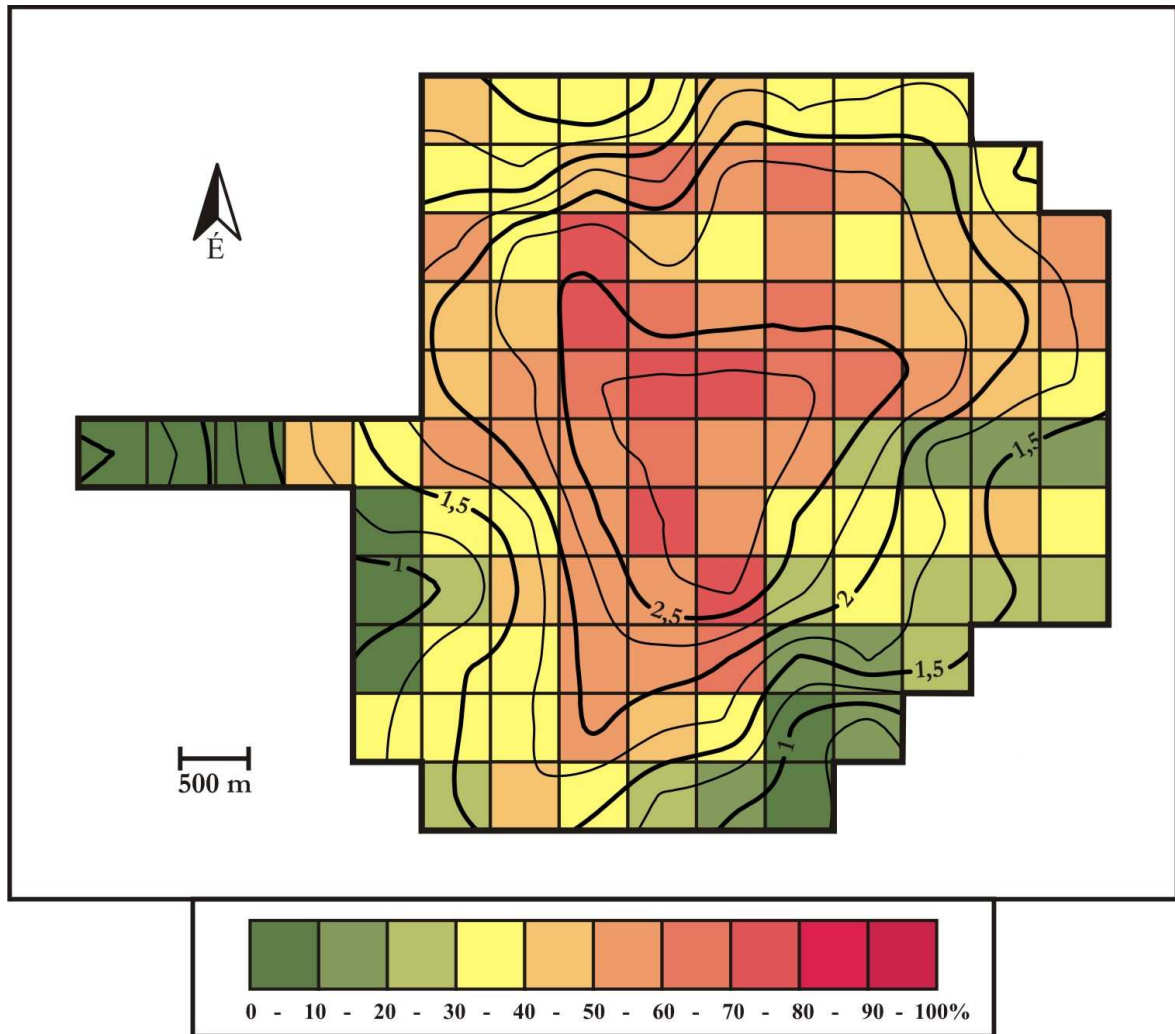
5.1.4. ábra Az UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) átlagos területi szerkezete fűtési (a) és nem-fűtési (b) időszakra vonatkozóan Debrecenben (2002–2003)

5.1.2. A beépítettség területi szerkezete és kapcsolata az átlagos UHI szerkezetével

A következőkben összevetem az általam meghatározott B_0 beépítettségi értékeket a korábban mért hőmérsékleti adatokkal (5.1.5. és 5.1.6. ábra). Ezek szerint egyértelmű kapcsolat áll fenn a beépítettség területi eloszlása és a hősziget szerkezete között, a beépítettségi értékek változását a hősziget-intenzitás szorosan követi.

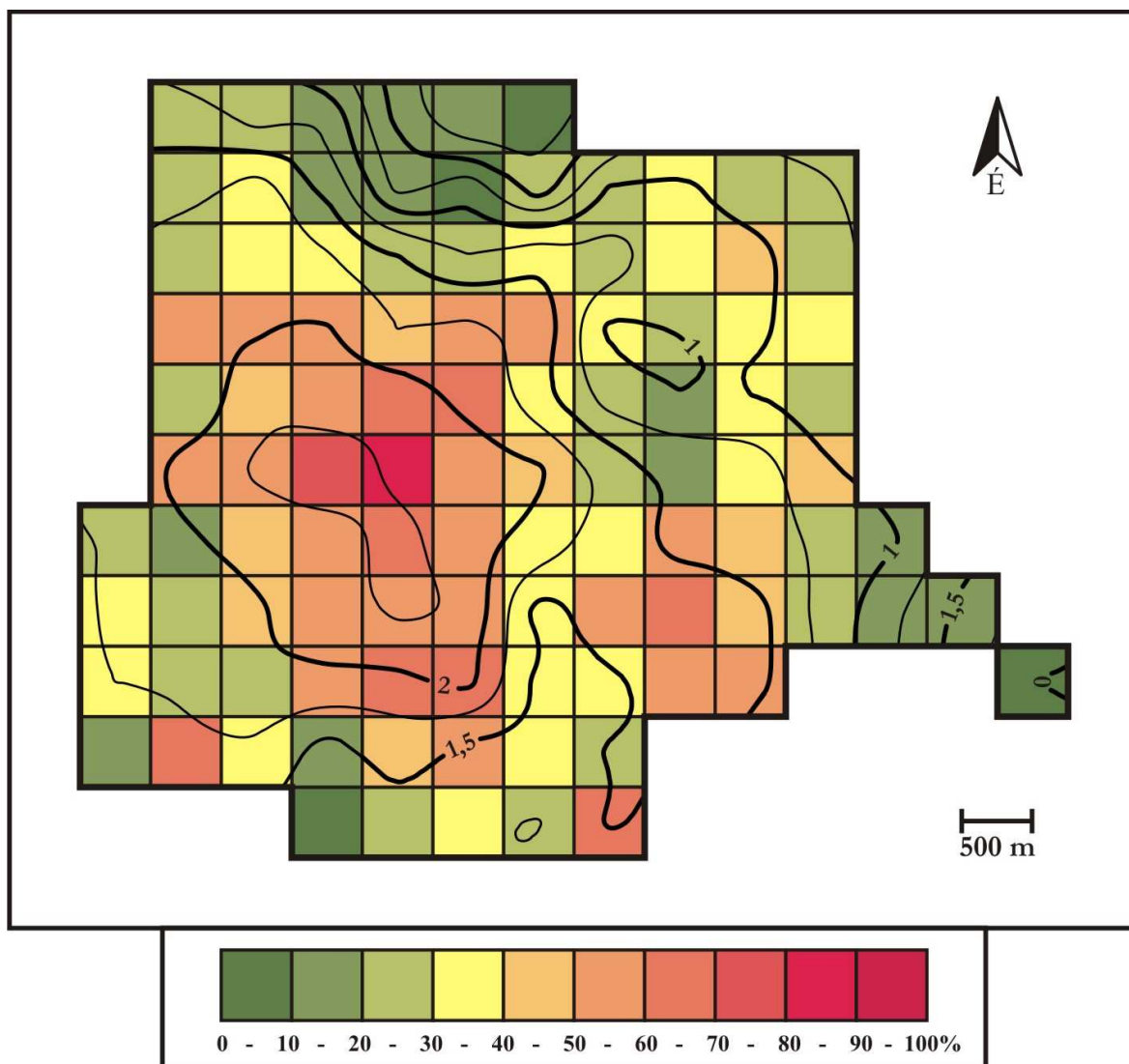
Szegeden a beépítettség viszonylag koncentrikusnak tekinthető. Ahol ez a koncentrikusság megtörik, ott a hősziget szerkezetén is megjelennek ennek nyomait (5.1.5. ábra). Erre példa a város központjától ÉK-re és ÉNy-ra található két anomália, amely területek

egybeesnek a nagy panel építésű lakótelepek körzeteivel. A beépítettség változása a terület Ny-DNy-i részén is hasonló eredményeket okoz. Itt zöldterületek és tavak szakítják meg a városi felszínt és ennek hatására az UHI gyengül. A B_0 paraméter alapján jól kirajzolódik a Tisza alacsony beépítettségű sávja, amivel jól magyarázható a területen kissé megváltozott hőmérsékleti mező.



5.1.5. ábra A beépítettség értékek (%) és az átlagos UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása Szegeden

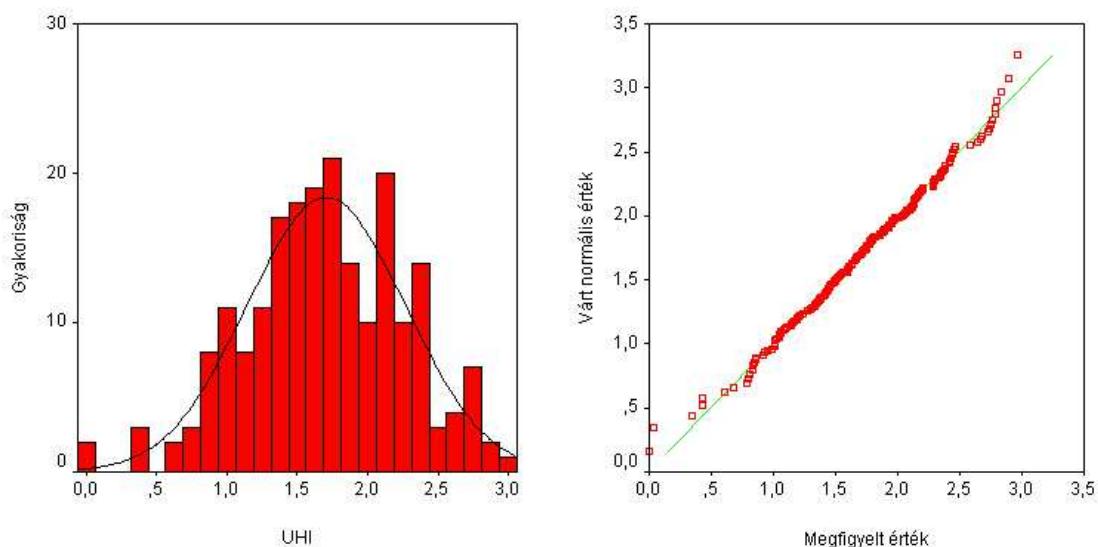
Debrecen féloldalas szerkezete tükröződik a hősziget területi kifejlődésében (5.1.6. ábra). Szegedhez hasonlóan itt is szorosan követi a beépítettség értékek változását a hősziget-intenzitás. Például nagy DK-i anomáliát okoz az ipartelepek magas beépítettség aránya. Északon viszont a Nagyerdő alacsonyabb beépítettség értékei az izotermákat a városközpont felé húzzák.



5.1.6. ábra A beépítettségi értékek (%) és az átlagos UHI intenzitás (°C) területi eloszlása Debrecenben

5.1.3. A felhasznált paraméterek statisztikai vizsgálata összesített adatbázis alapján

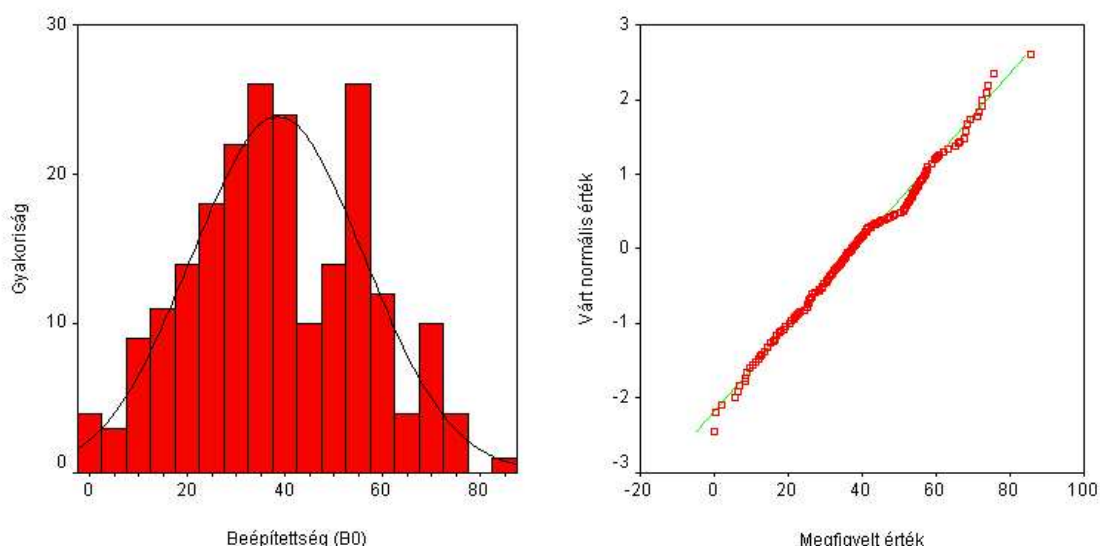
A Szegedre és Debrecenre vonatkozó összesített adatbázis alapján az éves átlagos UHI intenzitás és a paraméterek értékei közötti kapcsolatkeresés első lépése az adatok normalitás-vizsgálata, majd az összefüggések páronkénti összehasonlító ábrázolása és elemzése diagramok segítségével. Ennek során meghatároztam a felszínparaméter és az UHI közötti sztochasztikus kapcsolat szorosságára vonatkozó lineáris regressziós egyenes képletét (az $y = ax + b$ általános alaknak megfelelően), illetve a determinációs együttható (r^2) értékét.



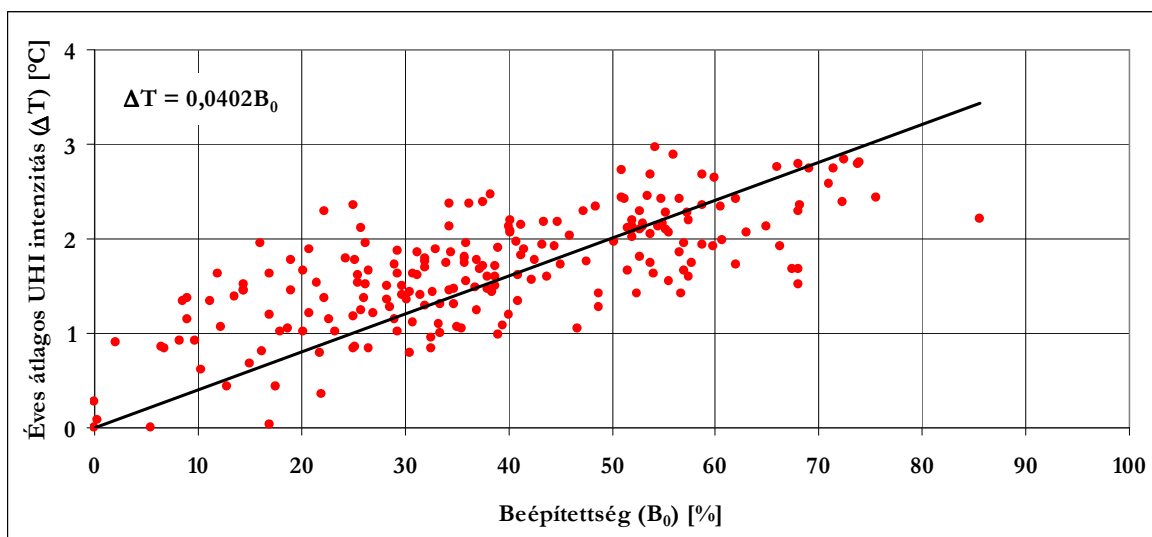
5.1.7. ábra Az UHI grafikus normalitás-vizsgálatával nyert eredmények
(hisztogram és Q-Q diagram) ($n=212$)

A ΔT hisztogramjára szépen illeszthető görbe, az adatok jól közelíthetők normális eloszlással (várható érték: $\mu = 1,68$; szórás: $\sigma = 0,59$), és az értékek transzformáltjai követik a standard normális transzformáltjának megfelelő egyenest a Q-Q (vagy kvantilis-kvantilis) diagramján (5.1.7. ábra), amely az adat értékek eloszlásának kvantiliseit, illetve az eloszlás analitikus kvantiliseit ábrázolja együtt. A normalitásra vonatkozó hipotézist a Kolmogorov-Szmirnov próba 95%-os megbízhatósági szinten elfogadja.

A B_0 hisztogramjáról és Q-Q diagramjáról hasonló következtetés vonható le ($\mu = 38,5$; $\sigma = 17,7$) (5.1.8. ábra). A Kolmogorov-Szmirnov próba 95%-os megbízhatósági szinten elfogadja a normalitásra vonatkozó hipotézist, így a B_0 és a ΔT közötti kapcsolat lineárisan jellemezhető a legjobban. A 5.1.9. ábra ezt szemlélteti együttesen Szegeden és Debrecenben, tehát összesen 212 elempár felhasználásával, figyelmen kívül hagyva a cellák elhelyezkedését. A beépítettség elméleti értéke 0 és 100% között változhat, azonban a vizsgált területeken 0 és 85,5% közötti beépítettségi értékek találhatók. Erős pozitív kapcsolat áll fenn e két paraméter között, azaz a beépítettség értékének növekedésével nő a város és környéke közötti hőmérsékleti különbség értéke is. A lineáris kapcsolat szorosságát a determinációs együttható magas értéke ($r^2 = 0,917$, $n = 212$) támasztja alá, ugyanis ennek a kritikus értéke – 212 elem esetén, 1%-os szignifikancia szinten – $r^2 = 0,032$ (Péczeley, 1979), tehát azon null-hipotézis, miszerint a két paraméter között nincs kapcsolat, egyértelműen elvethető. A regressziós egyenes körüli szórás ez esetben $0,10^\circ\text{C}$.

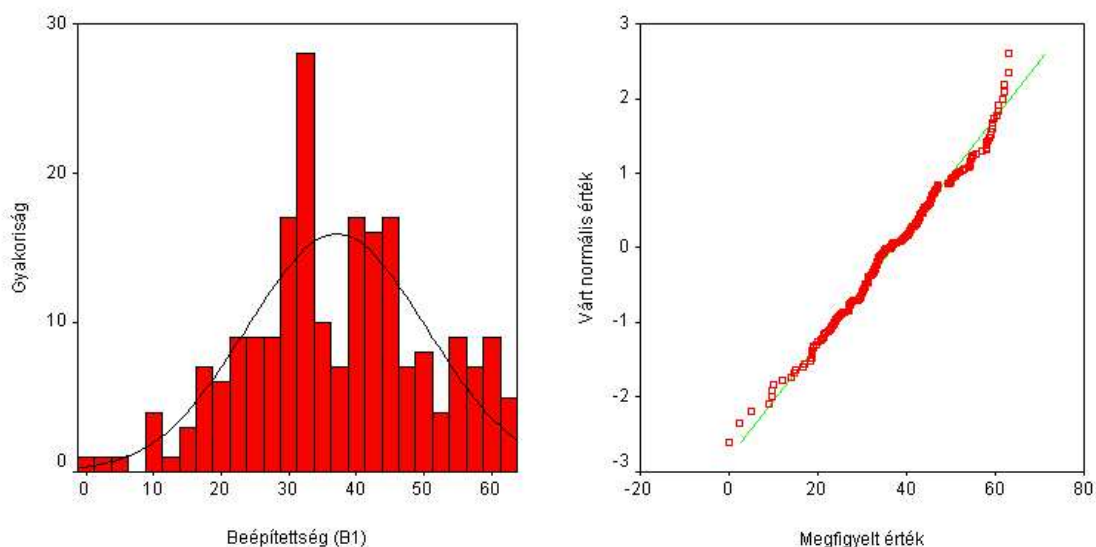


5.1.8. ábra A B_0 paraméter grafikus normalitás-vizsgálatával nyert eredmények (hisztogram és Q-Q diagram) ($n=212$)

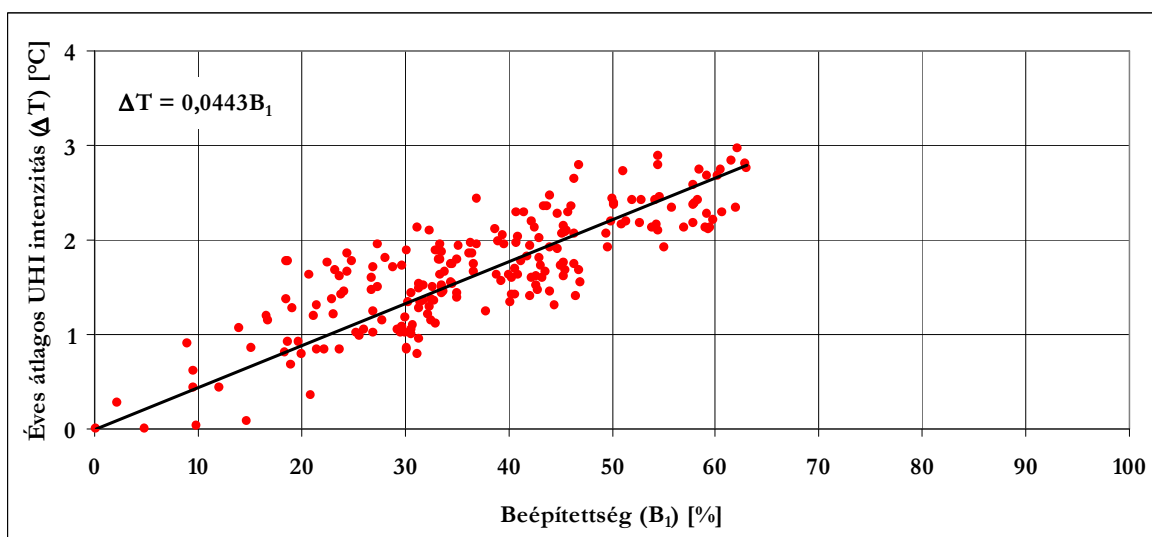


5.1.9. ábra Az éves átlagos UHI intenzitás (2002–2003) és B_0 paraméter kapcsolata Szegeden és Debrecenben együtt ($n=212$)

A B_1 értékek is normális eloszlásúak ($\mu = 37,1$; $\sigma = 13,3$) (5.1.10. ábra), hiszen a normalitásra vonatkozó hipotézist a Kolmogorov-Szmirnov próba 95%-os megbízhatósági szinten elfogadja, így a két mennyiség közötti kapcsolat lineárisan közelíthető legjobban. A három beépítettségi paraméter közül a B_1 áll a legszorosabb, pozitív kapcsolatban a ΔT értékeivel (5.1.11. ábra), itt a determinációs együttható értéke 0,962. Ez azt jelenti, hogy egy adott cella hőmérsékletére a környezet beépítettsége nagyobb hatással van, mint ön-maga beépítettsége – gondoljunk csak egy alacsony beépíttségű belvárosi parkra (4.3.5. ábra). A regressziós egyenes körüli szórás ez esetben mindössze $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$.

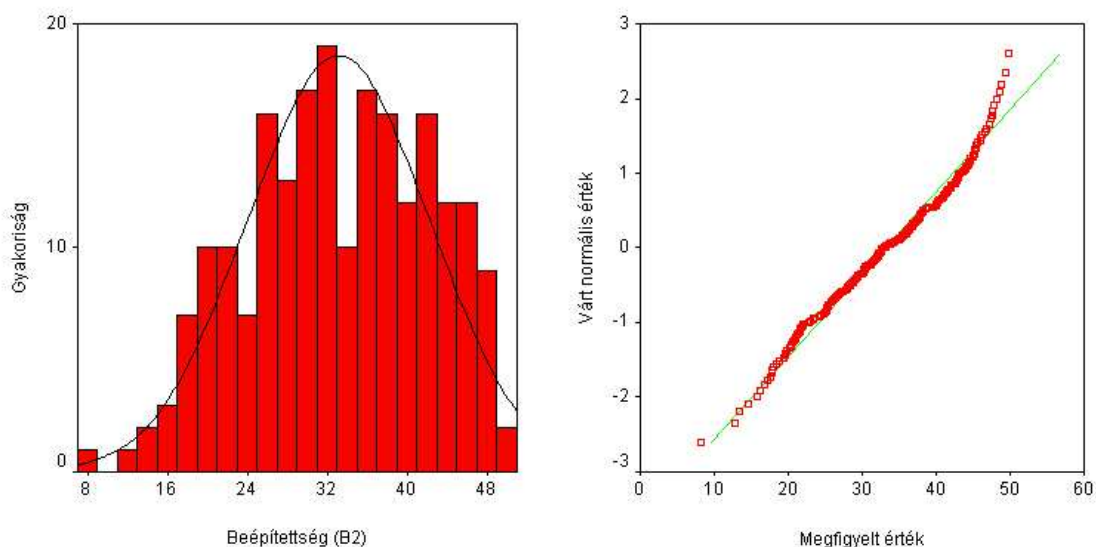


5.1.10. ábra A B_1 paraméter grafikus normalitás-vizsgálatával nyert eredmények (hisztogram és Q-Q diagram) ($n=212$)

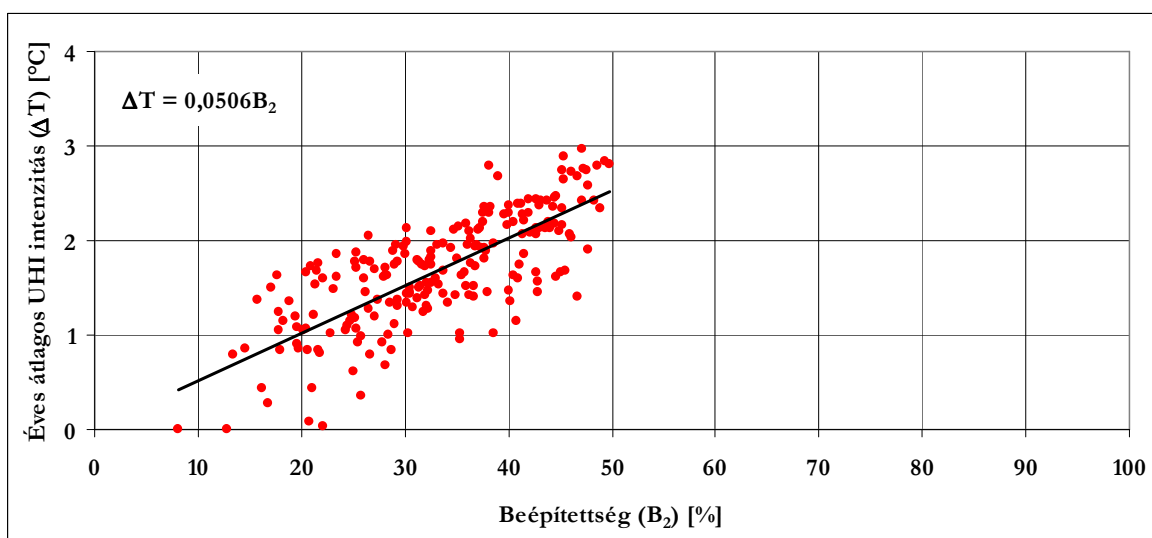


5.1.11. ábra Az éves átlagos UHI intenzitás (2002–2003) és B_1 paraméter kapcsolata Szegeden és Debrecenben együtt ($n=212$)

A Kolmogorov-Szmirnov próba 95%-os megbízhatósági szinten elfogadja a normalitásra vonatkozó hipotézist a B_2 értékek esetében is ($\mu = 33,1$; $\sigma = 9,1$) (5.1.12. ábra). Erős pozitív kapcsolat áll fenn a B_2 paraméter és az éves átlagos UHI intenzitás között (5.1.13. ábra). A lineáris kapcsolat szorosságát a determinációs együttható magas értéke ($r^2 = 0,953$, $n = 212$) támasztja alá. A regressziós egyenes körüli szórás ez esetben csupán $0,08$ °C. A B_2 értékei közeledtek egymáshoz ($8,2 \leq B_2 \leq 49,7$), ami a tágabb környezet értékkiegyenlítő hatására utal, ezért feltehetően nem érdemes további nagyobb környezeteket figyelembe venni.

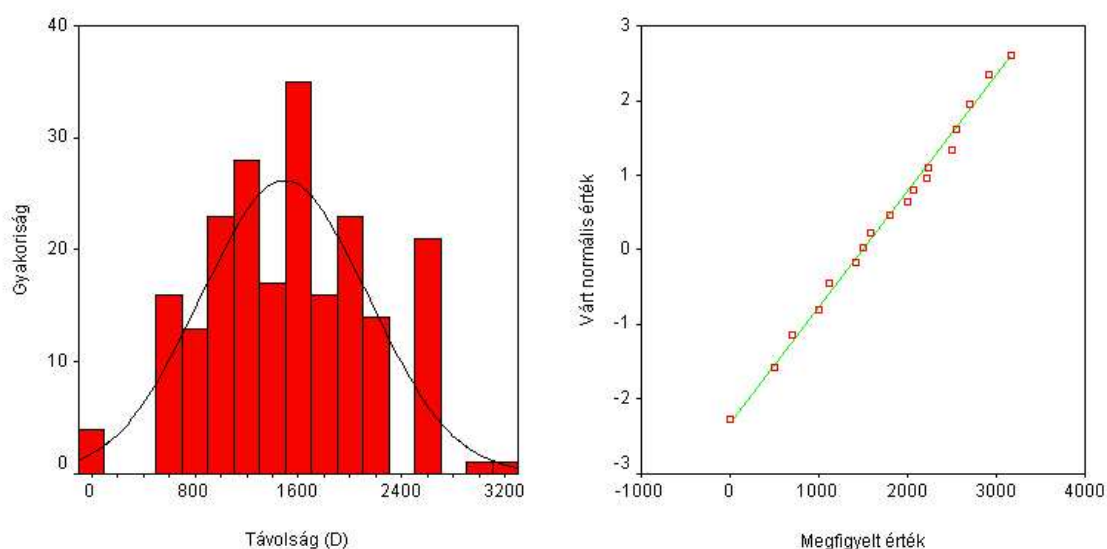


5.1.12. ábra A B_2 paraméter grafikus normalitás-vizsgálatával nyert eredmények (hisztogram és Q-Q diagram) ($n=212$)

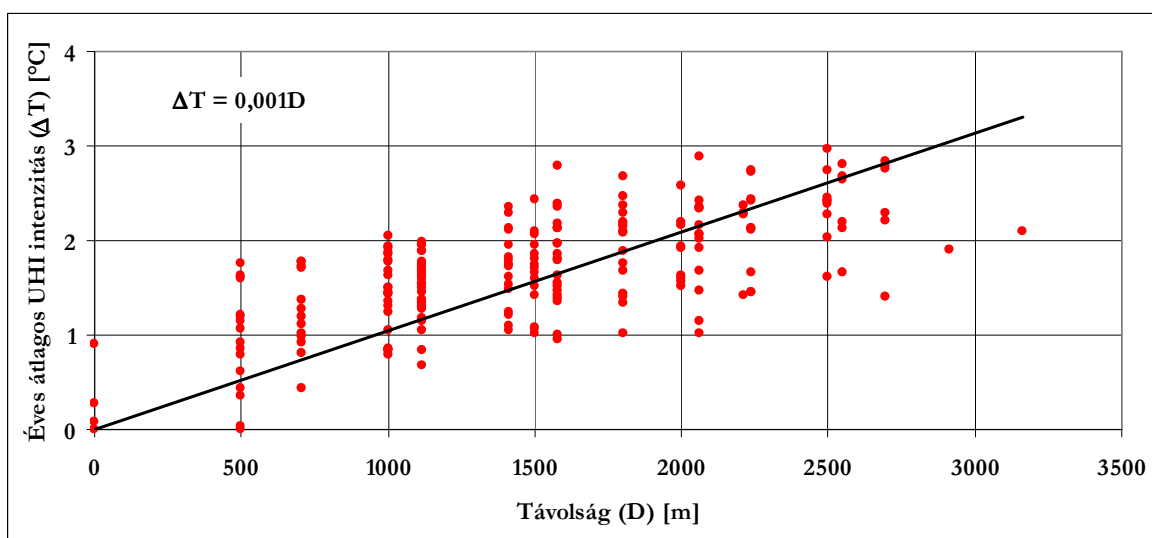


5.1.13. ábra Az éves átlagos UHI intenzitás (2002–2003) és B_2 paraméter kapcsolata Szegeden és Debrecenben együtt ($n=212$)

Normális eloszlásúak a távolság értékei is ($\mu = 1493$; $\sigma = 645$) (5.1.14. ábra). E paraméter és a ΔT közötti összefüggés statisztikai vizsgálatokor erős pozitív kapcsolatot találtam (5.1.15. ábra). A determinációs együttható értéke 0,914. A regressziós egyenes körüli szórás ez esetben 0,10 °C. A távolság természetes alapú logaritmusa és az éves átlagos UHI intenzitás között egy még szorosabb kapcsolat mutatható ki, itt $r^2 = 0,922$.



5.1.14. ábra A D paraméter grafikus normalitás-vizsgálatával nyert eredmények (hisztogram és $Q-Q$ diagram) ($n=212$)



5.1.15. ábra Az éves átlagos UHI intenzitás (2002–2003) és a távolság kapcsolata Szegeden és Debrecenben ($n=212$)

5.1.1. táblázat A felszínparaméterek és a ΔT kapcsolata

Változó	Lineáris regressziós egyenlet	Determinációs együttható
B_0	$\Delta T = 0,0402B_0$	$r^2 = 0,917$
B_1	$\Delta T = 0,0443B_1$	$r^2 = 0,962$
B_2	$\Delta T = 0,0506B_2$	$r^2 = 0,953$
D	$\Delta T = 0,001D$	$r^2 = 0,914$
$\ln D$	$\Delta T = 0,238 \ln D$	$r^2 = 0,922$

Az 5.1.1. táblázat összefoglalja a felszínparaméterek és a ΔT statisztikai kapcsolatát. Ezek az adatok kiterjednek a teljes 212 cellát lefedő vizsgált területre, de a modellhez ebből csak 207 elemet használok fel, ugyanis a modellezéshez felhasznált városi terület kompaktságára való törekvés miatt a kinyúló referencia cellákat nem vettem figyelembe – ez Szegeden 4, Debrecenben 1 cellát érint.

5.2. A többváltozós hősziget intenzitás-eloszlási modell felépítése

Mint ahogy már említettem, dolgozatom alapvető célja az, hogy Szeged és Debrecen adatai alapján egy általános, felszínparamétereken alapuló többváltozós modellt készítssek, amely egy közelítést ad az átlagos hősziget területi szerkezetére olyan alföldi városokban, ahol nem áll rendelkezésre hőmérsékleti mérés.

Tehát a többváltozós modellem elemei a következők:

- ΔT , mint függő változó ($^{\circ}\text{C}$),
- B_0' , B_1' , B_2' , mint független változók (dimenzió nélkül).

Vizsgálataim eredményei szerint a városi felszín paraméterei és az UHI átlagos intenzitás közötti kapcsolatok jól leírhatók lineáris függvénnyel, ezért a modell megalkotásakor is lineáris közelítéssel éltem, hasonlóan a *Bottyán and Unger* (2003) és *Bottyán et al.* (2005) munkáiban alkalmazottakhoz.

A SPSS szoftver többváltozós regressziós eljárását alkalmazva a következő empirikus modell-egyenletet kaptam eredményül az éves átlagos hősziget intenzitásának területi szerkezetére (*Balázs et al.*, 2008):

$$\Delta T = 0,001032 \cdot B_0' + 0,002455 \cdot B_1' + 0,002629 \cdot B_2' \quad (r^2 = 0,97) \quad [5.1]$$

A három együttható szignifikancia szintje kisebb, mint 0,001. A kapott statisztikai mutatók szerint a három paraméternek a hőmérsékleti többlet kialakításában betöltött szerepe 97%. Így az [5.1] modell-egyenlet alapján készített közelítés megbízhatósága rendkívül jónak mondható.

Fontos megjegyezni, hogy éves átlagos hőszigeti mező esetében a változékonny meteorológiai tényezők hatása a hőmérsékleti többlet alakításában kiegyenlítődik az év során az átlagolás miatt, ezzel szemben a felszín mesterséges borítottsága állandónak tekinthető, így ennek szerepe a meghatározó. A 2.3.1. táblázatban bemutatott, a hősziget kialakulását befolyásoló tényezők – egy kivételével – mind a beépítettséghez köthetők.

5.2.1. táblázat A távolsággal kombinált felszínparaméterek szerepe a modell-egyenletben

Változó	Lineáris regressziós egyenlet	Determinációs együttható	Determinációs együttható változás
B_1'	$\Delta T = 0,005770 B_1'$	$r^2 = 0,963$	0,000
B_1' B_2'	$\Delta T = 0,003537 B_1' + 0,002614 B_2'$	$r^2 = 0,969$	0,006
B_1' B_2' B_0'	$\Delta T = 0,002455 B_1' + 0,002629 B_2' + 0,001032 B_0'$	$r^2 = 0,971$	0,002

A többváltozós modell kifejlesztésénél megvizsgáltam, hogy a beléptetési lineáris regressziós eljárással milyen sorrend alakul ki a távolsággal kombinált felszínparaméterek között (5.2.1. táblázat). Az első belépő paraméter a B_1' mutató, amely 96,3%-ban határozza meg az éves átlagos UHI intenzitást. Ezt követi a B_2' (96,9%), majd kis különbséggel a B_0' paraméter (97,1%), de mindkét mutató javít a modell megbízhatóságán.

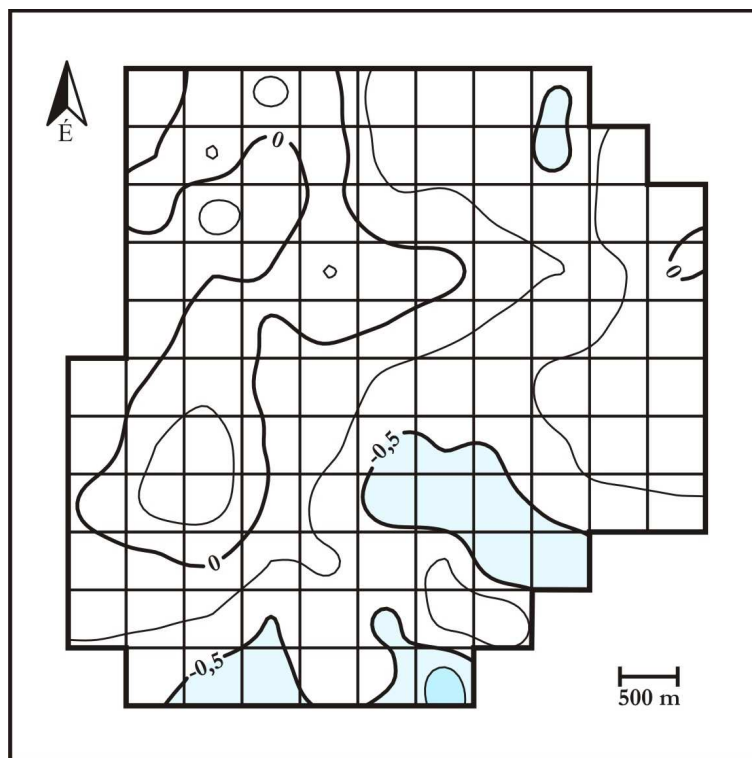
A modellhez együttesen felhasznált szegedi és debreceni adatokban a paraméterek értékének határai az 5.2.2. táblázat szerint alakultak. A modell kiterjesztésekor akkor kaphatunk megbízható eredményt, ha a vizsgálandó terület értékei is ezekbe az intervallumokba esnek. A modell-egyenlet nem tartalmaz konstans, ennek következtében, ha a független változók nulla értéket vesznek fel valamely helyen, akkor ott a függő változó, azaz az UHI intenzitás is nulla. Ez természetesen egybehangzik a tapasztalatokkal is, hiszen a beépítetlen vagy alig beépített területek gyakorlatilag nem generálnak hőmérsékleti többletet.

5.2.2. táblázat A modell érvényességi intervallumai a szegedi és debreceni adatok alapján (207 cella alapján)

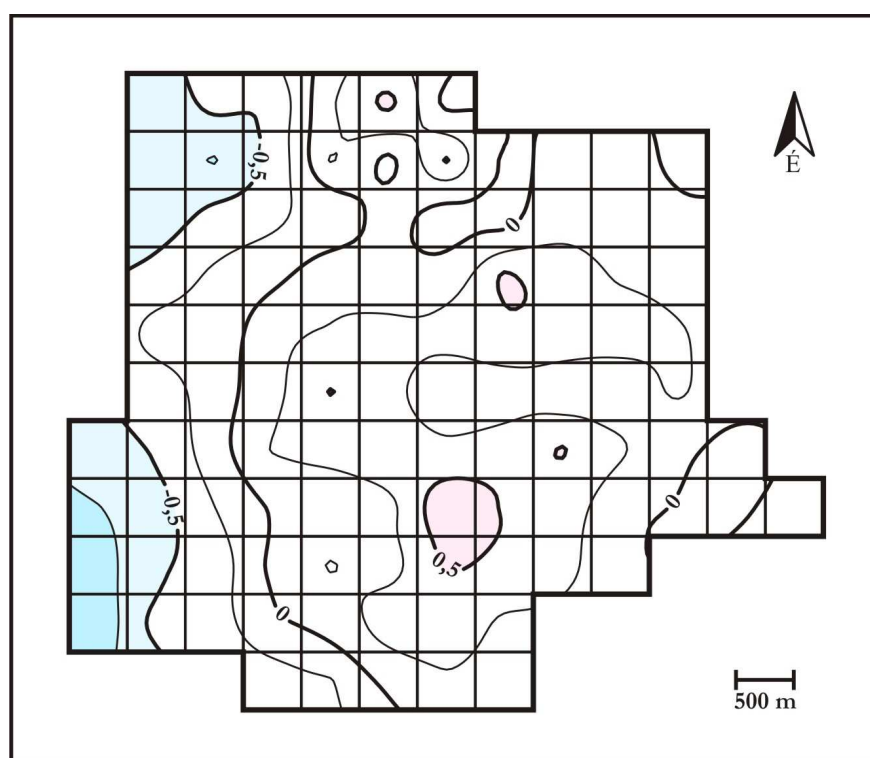
Paraméter	Minimum	Maximum
B_0 (%)	6,5	85,5
B_1 (%)	9,6	63,1
B_2 (%)	13,5	49,7
B_0' (%)	40,4	675
B_1' (%)	59,4	498
B_2' (%)	92,9	390
D (m)	500	3162
ΔT (°C)	0,04	2,96

A továbbiakban (lásd 5.4. fejezet) ezt a – Szeged és Debrecen 207 cellájának értékein alapuló – közös modellt alkalmazom hasonló éghajlati és domborzati körülményekkel (Alföld) rendelkező, különböző méretű városokra annak kimutatására, hogy e településeken mennyire erős és milyen a mintázata az átlagos hőszigetnek.

Érdemes azt is megnézni, hogy a modellezésre használt területeken a kapott modell-egyenlet mennyire adja vissza az eredeti UHI mezőt. A 5.2.1. és 5.2.2. ábra a 2002–2003-ban mért és a modellezett éves átlagos ΔT különbségtérképe Szegeden, illetve Debrecenben. Az ábrák szerint mindkét városban a vizsgált terület nagy részén a hőmérséklet eltérés 0,5 °C alatt marad, ami azt tükrözi, hogy a modell jól reprodukálja az eredeti hőmérsékleti mezőt.



5.2.1. ábra A 2002–2003-ban mért és a modellezett éves átlagos ΔT különbségtérképe Szegeden ($^{\circ}\text{C}$)

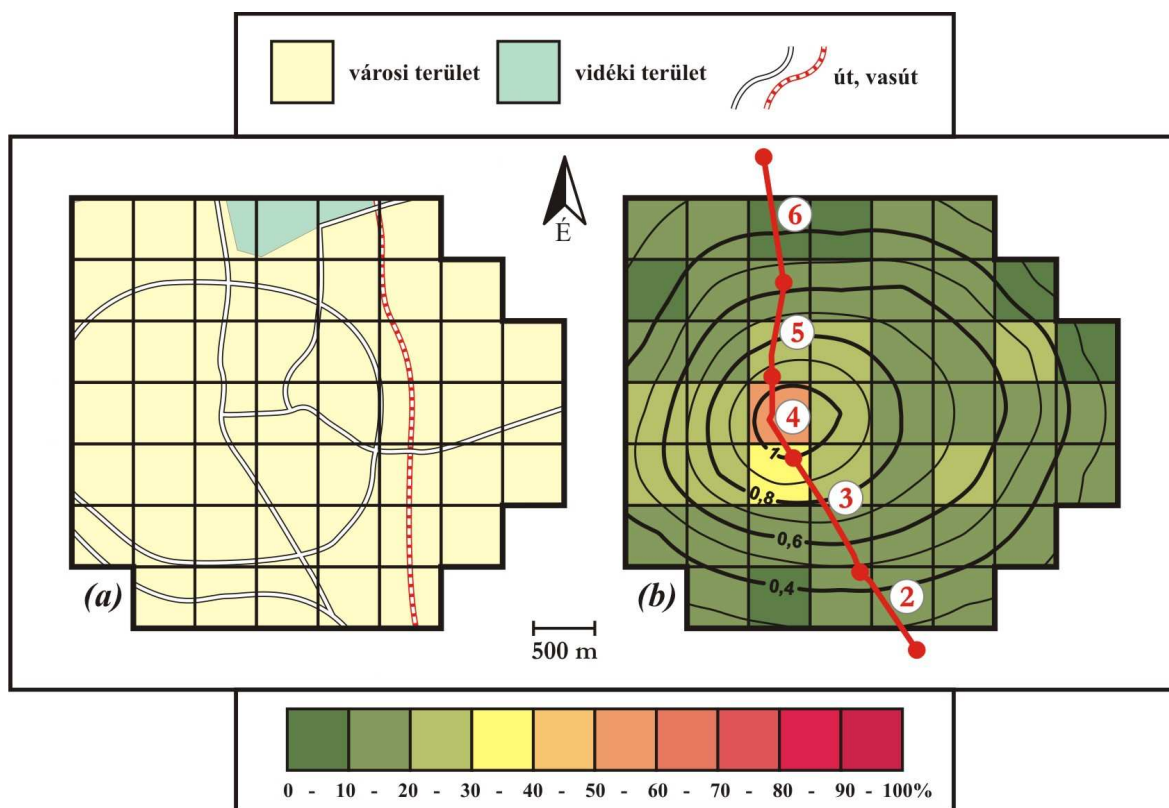


5.2.2. ábra A 2002–2003-ban mért és a modellezett éves átlagos ΔT különbségtérképe Debrecenben ($^{\circ}\text{C}$)

5.3. Validáció

Ahhoz, hogy teszteljem a kapott modell alkalmazhatóságát, megbízhatóságát, szükségem volt olyan adatbázisra, amely független a modellhez felhasznált szegedi és debreceni adatoktól, viszont hasonló földrajzi adottsággal rendelkező városokból származik. Két adatbázis állt rendelkezésemre: az egyik adatait három alföldi városban – Hajdúböszörményben, Hajdúdorogon és Hajdúnánáson – gyűjtötték 2003. szeptember és 2005. január között, másikat pedig Szegeden egy éves mérési periódusban 1999. március – 2000. február között.

Mint fentebb említettem (lásd 4.1.3. fejezet), Hajdúböszörmény, Hajdúdorog és Hajdúnánás Debrecenhez közeli fekvésűek, hasonló természetföldrajzi adottságokkal és szerkezettel rendelkező hajdúsági városok, az Alföldön gyakori 30, 20 és 10 ezer fő körüli lakossággal, továbbá (lásd 4.2. fejezet) itt a hőmérsékleti adatgyűjtések keresztmetszeti mérőútvonalak mentén folytak (5.3.1., 5.3.2., 5.3.3. ábra). Ezek a keresztmetszeti utak áthaladnak a települést jellemző területhasználati típusokon. Egy-egy beépítési típus jelent egy-egy mérési szakaszt, melyet egy sorszámmal láttak el 1–7-ig. Az ábrákon az 1-es és 7-es szakasz nincs feltüntetve, mert ezek a városhoz tartozó külterületi részekben vannak, amelyekhez, mint lokális 0 értékekhez, meghatározható az adott településen a hősziget intenzitása.



5.3.1. ábra Hajdúböszörmény strukturális vázlata (a), valamint a beépítettség és a modellezett éves átlagos UHI intenzitás területi eloszlása a mérőútvonal szakaszaival (b)

Hajdúböszörménynek a modell alkalmazásához használt (vizsgált) területe 49 cellából áll (12,25 km²) (5.3.1. ábra). Az 5.3.1.a ábrán a város szerkezeti vázlatát láthatjuk, a 5.3.1.b ábrán pedig a cellák beépítettségi értékét, az [5.1] modell-egyenletből kapott éves átlagos ΔT területi eloszlását, valamint a szakaszokkal tagolt mérőútvonalat. A modellezett hősziget alakja nagyon szép szabályos, ami a város szerkezetének köszönhető. A 4. szakasz éppen a legmagasabb beépítettségi értékkel rendelkező cellán (51,5%) halad keresztül. Ez a beépítettségi érték teljesen összhangban van a korábbi vizsgálatok adataival (Szegegyedi, 2005). Itt a mért éves átlagos UHI intenzitás 0,9 °C, a modell közelítése pedig 1,0 °C. A mért és a modellezett ΔT értékeket szakaszonként az 5.3.1. táblázatban hasonlíthatjuk össze. Általában elmondható, hogy jó egyezés tapasztalható a két csoport között (az átlagos abszolút eltérés kisebb, mint 0,05 °C).

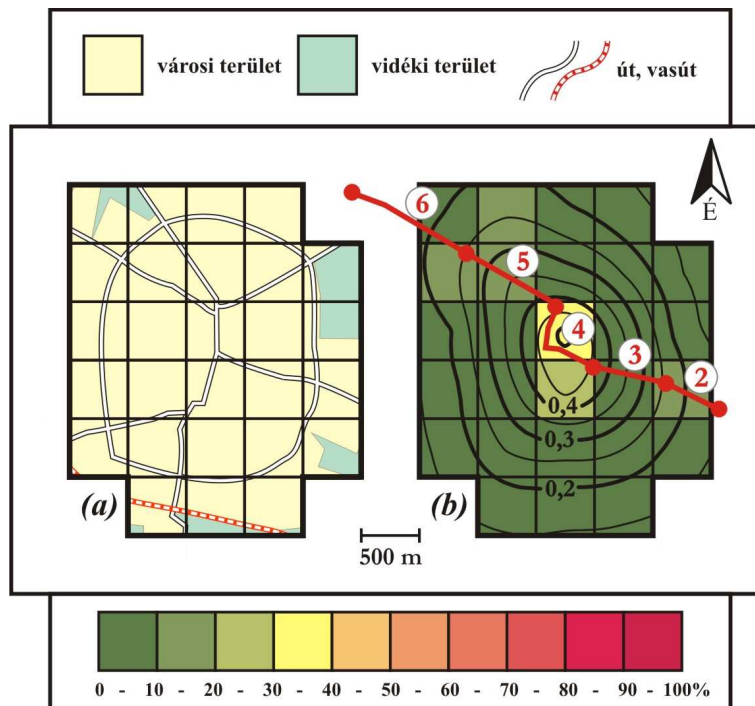
5.3.1. táblázat A mért és a modellezett átlagos UHI intenzitási értékek (°C) szakaszonként Hajdúböszörményben

szakasz	mért UHI (°C)	modellezett UHI (°C)
2. városperemi, nem egybefüggően beépített terület	0,45	0,37
3. kisvárosi beépítés	0,75	0,74
4. városközpont (1–5 szintes épületek)	0,90	1,02
5. kisvárosi beépítés	0,75	0,76
6. ritka beépítésű ipari terület	0,40	0,42

A következő, 5.3.2. ábra a vizsgált területet ábrázolja Hajdúnánáson, amelyet 27 cella alkot (6,75 km²). A hősziget alakja kevésbé koncentrikus, mint Hajdúböszörményben. A mért átlagos ΔT a központban 0,7 °C, míg a modellezett 0,5 °C. Itt a beépítettségi érték 34,5%-os. A mért és a modellezett UHI intenzitási értékek szakaszonkénti összehasonlításáról itt általában elmondható (5.3.2. táblázat), hogy a modell kissé alábecsüli a mért adatokat (átlagosan 0,13 °C-kal).

5.3.2. táblázat A mért és a modellezett átlagos UHI intenzitási értékek (°C) szakaszonként Hajdúnánáson

szakasz	mért UHI (°C)	modellezett UHI (°C)
2. városperemi, nem egybefüggően beépített (falusias) terület	0,25	0,20
3. kisvárosi beépítés	0,50	0,34
4. városközpont (1–5 szintes épületek)	0,70	0,48
5. kisvárosi beépítés	0,50	0,35
6. városperemi, nem egybefüggően beépített (falusias) terület	0,25	0,18

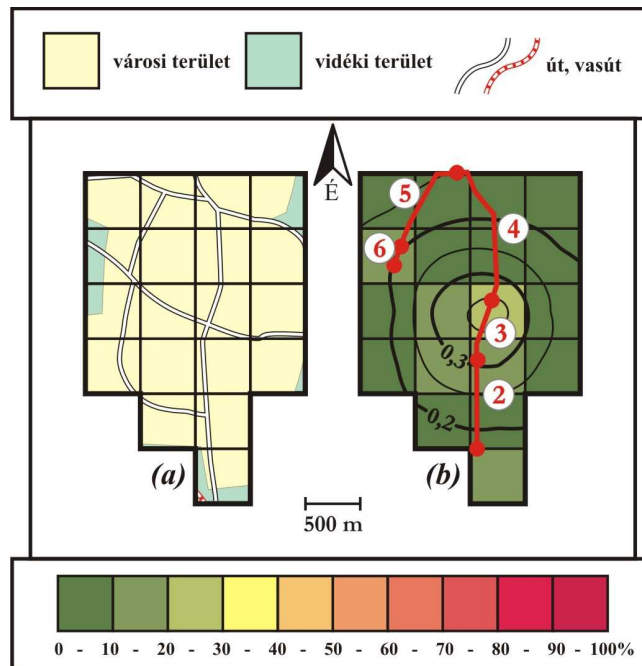


5.3.2. ábra Hajdúnánás strukturális vázlata (a), valamint a beépítettség és a modellezett éves átlagos UHI intenzitás területi eloszlása a mérőútvonal szakaszaival (b)

Hajdúdorog vizsgált területe 19 cellára terjed ki. A központban a mért és a modellezett UHI intenzitás $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. A legmagasabb beépítettségi érték $23,5\%$. A mért és a modellezett ΔT érték-párokat az 5.3.3. táblázat tartalmazza, amely szerint ezen a legkisebb településen (ahol alig mutatható ki a hősziget), a modell-eredmények egy kis felülbecslést jelentenek (átlagosan $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot).

5.3.3. táblázat A mért és a modellezett átlagos UHI intenzitási értékek ($^{\circ}\text{C}$) szakaszonként Hajdúdorogon

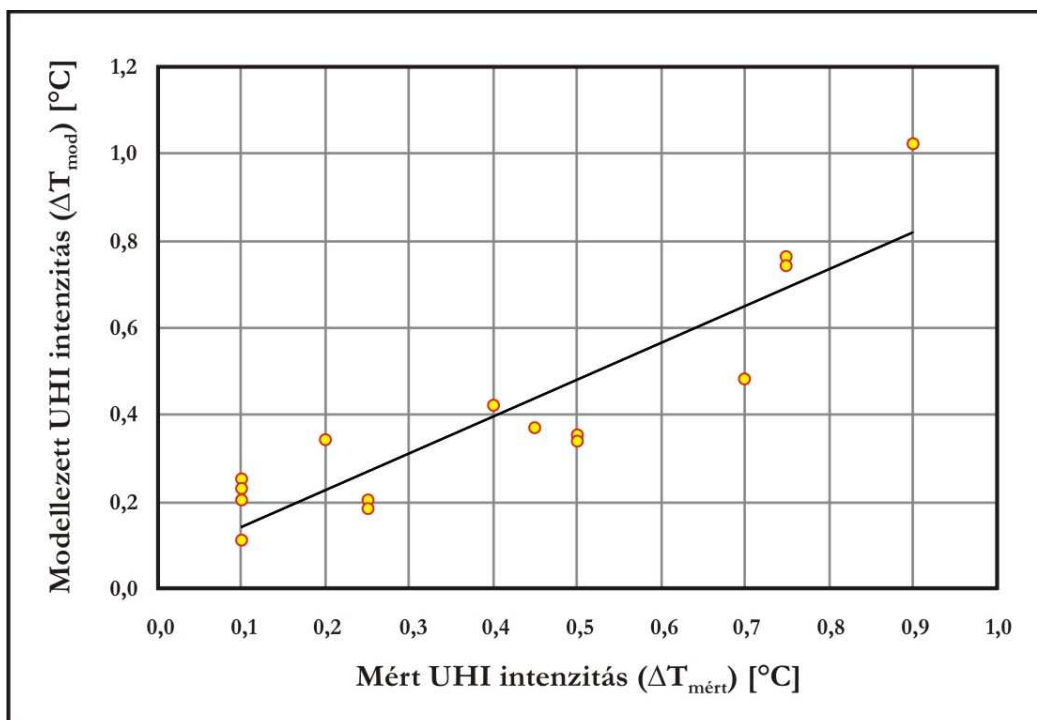
szakasz	mért UHI ($^{\circ}\text{C}$)	modellezett UHI ($^{\circ}\text{C}$)
2. kisvárosi beépítés	0,10	0,25
3. városközpont (1–5 szintes épületek)	0,30	0,34
4. városon belüli mély fekvésű, ritka beépítésű nedves (nádas) zöldterület	0,10	0,23
5. kisvárosi beépítés	0,10	0,11
6. városperemi, nem egybefüggően beépített (falusias) terület	0,10	0,20



5.3.3. ábra Hajdúdorog strukturális vázlata (a), valamint a beépítettség és a modellezett éves átlagos UHI intenzitás területi eloszlása a mérőútvonal szakaszaival (b)

Az éves átlagos mért és modellezett UHI intenzitás közötti együttes összefüggés a három városban rendelkezésre álló összesen 15 elempár segítségével határozható meg (mért – $\Delta T_{\text{mért}}$ és modellezett – ΔT_{mod}). Az elempárok átlagos abszolút eltérése kisebb, mint $0,09^{\circ}\text{C}$.

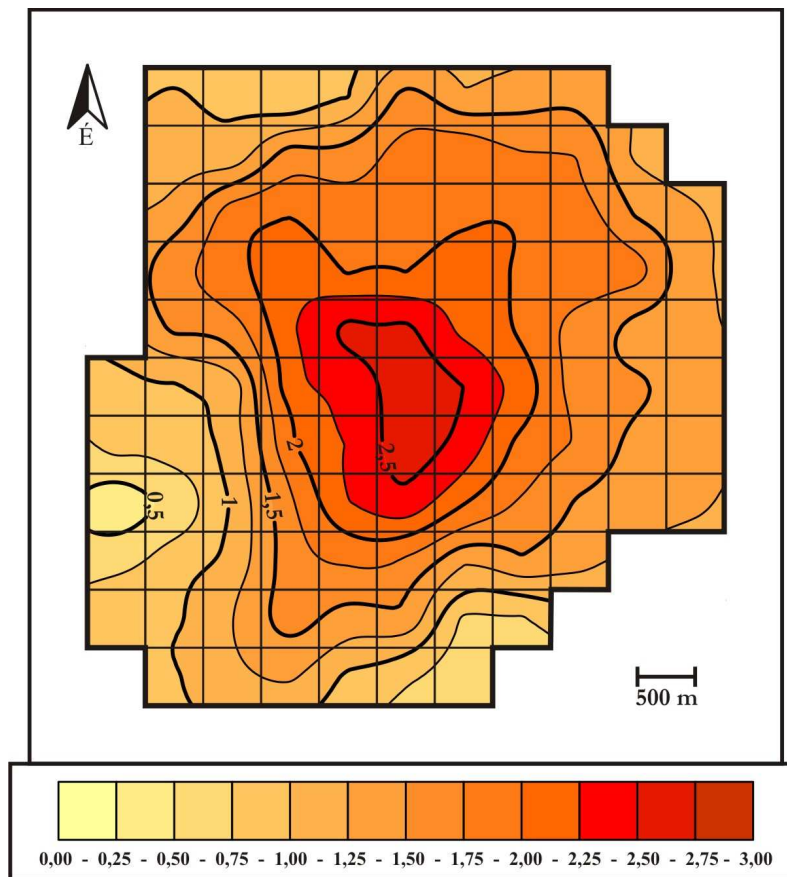
Erős pozitív kapcsolat áll fenn a mért és a modellezett ΔT értékei között (5.3.4. ábra). A lineáris kapcsolat szorosságát a determinációs együttható magas értéke ($r^2 = 0,816$, $n = 15$) támasztja alá, ennek a kritikus értéke ugyanis 15 elem esetén, 1%-os szignifikancia szinten $r^2 = 0,397$ ($r = 0,63$). Tehát azon null-hipotézis, miszerint a két paraméter között nincs kapcsolat, egyértelműen elvethető, továbbá 99%-os biztonsággal állíthatom, hogy a két paraméter között reális kapcsolat áll fenn. A regressziós egyenes körüli szórás mindössze $0,11^{\circ}\text{C}$.



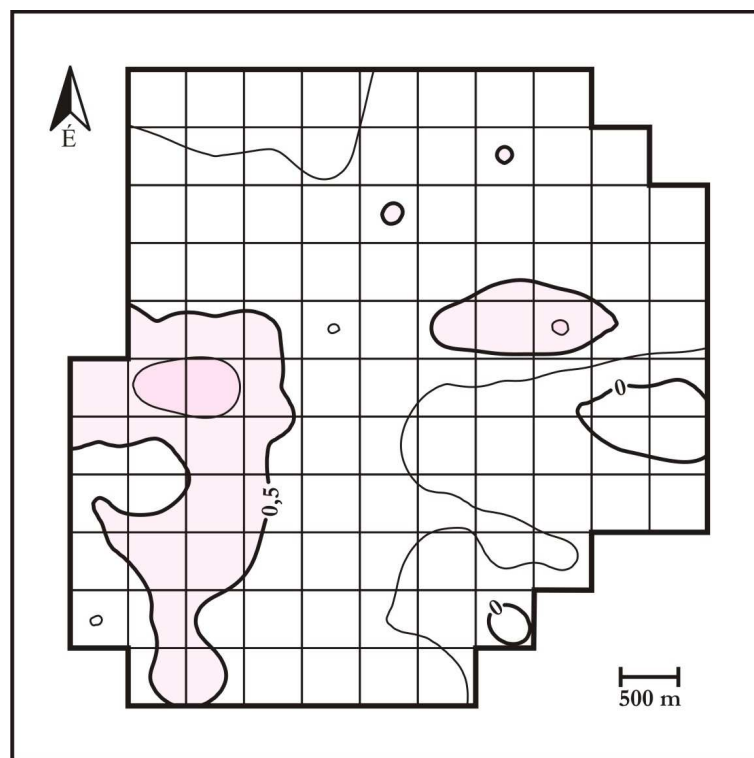
5.3.4. ábra A három hajdúsági városban az átlagos mért és a modellezett UHI intenzitás értékei (°C) közötti kapcsolat ($n=15$)

Mint korábban említettem (4.2. fejezet), Szegeden kétszer egy éves periódusban volt hőmérsékleti mérés (Unger *et al.*, 2001b), de a modell-egyenlethez csak a 2002–2003-ban gyűjtött adatokat alkalmaztam a debreceni adatokkal közösen. Így a 1999–2000-es független adatsor 103 eleme is felhasználható a modell validálásához. Az 5.3.5. ábra a hősziget éves átlagos területi szerkezetét mutatja Szegeden az 1999. március – 2000. február között gyűjtött adatokból. Összehasonlítva az 5.1.1. ábrával, látható, hogy az UHI intenzitás maximuma alulmúlja a 2002–2003-as értékeket: 1999–2000-ben a legnagyobb átlagos UHI intenzitás 2,60 °C volt, míg 2002–2003-ban 2,97 °C. A legnagyobb különbség a két periódusban mért hősziget között a vizsgált terület nyugati oldalán jelentkezik az ipari területek felett (5.3.6. ábra). Azonban a teljes terület kb. 85%-án a különbség kisebb 0,5 °C-nál.

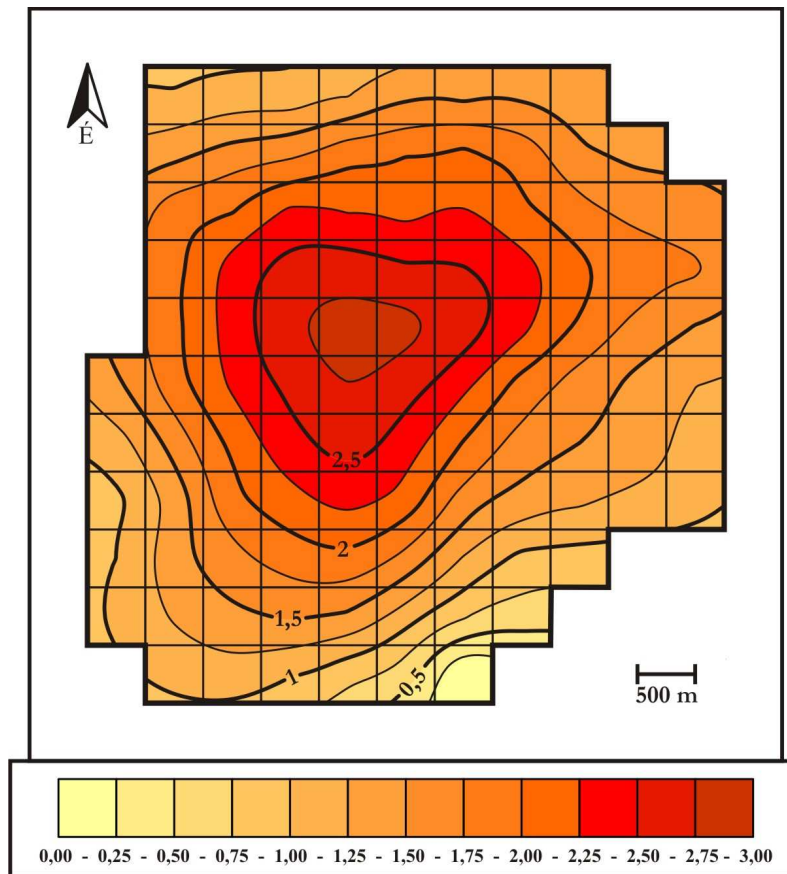
Szegeden a modellezett UHI intenzitás területi szerkezete némileg leegyszerűsödött és az izotermák futása kiegyenlítettebb, kevésbé részletes (5.3.7. ábra), mint az 1999-2000 és 2002-2003 mért hőszigetek (5.1.1. és 5.3.5. ábra) esetében, viszont felépítésének főbb sajátosságai lényegében azonosnak tekinthetők velük. Az 5.3.8. ábrán az 1999–2000-ben mért éves átlagos UHI kifejlődés és a modellezett éves átlagos UHI kifejlődés különbségtérképét láthatjuk. Mint várható volt, a legnagyobb különbségek ugyanott jelentkeznek, mint az 5.3.6. ábrán. A modell nagyon jónak mondható, hiszen a terület több mint 85%-án a hőmérsékleti különbség 0,5 °C alatt marad.



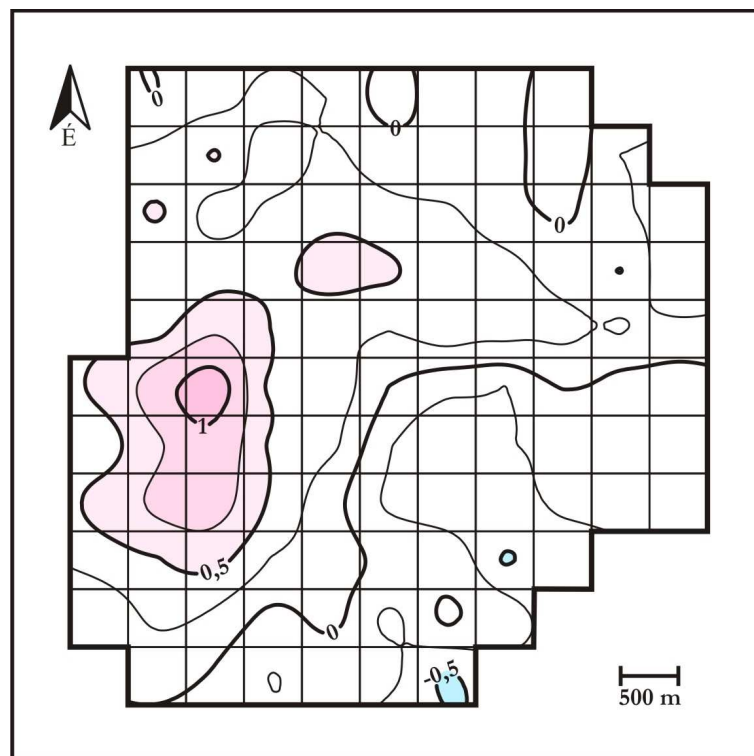
5.3.5. ábra Az UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) átlagos területi szerkezete Szegeden (1999–2000)



5.3.6. ábra Az 1999–2000-ben, illetve 2002–2003-ban mért éves átlagos ΔT különbségtérképe ($^{\circ}\text{C}$)

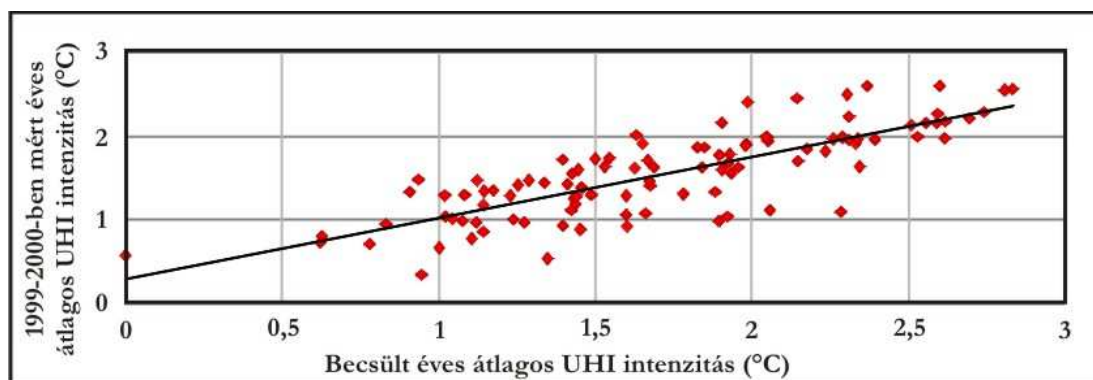


5.3.7. ábra A modellezett UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) átlagos területi szerkezete Szegeden



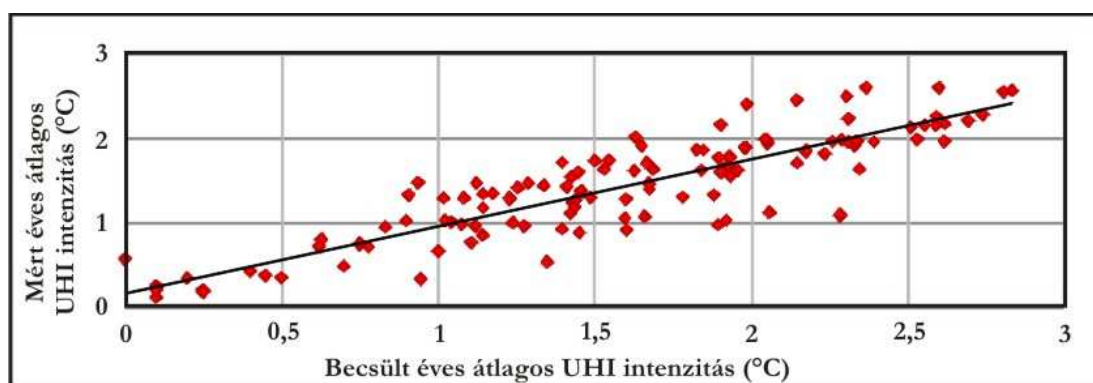
5.3.8. ábra A teljes területre vonatkozó 1999–2000-ben mért és a modellezett éves átlagos ΔT különbségtérképe ($^{\circ}\text{C}$)

Ahhoz, hogy statisztikailag is alátámasztható legyen a modell megbízhatósága, megvizsgáltam az 1999–2000-ben mért ΔT és a modellezett hősziget kapcsolatát a szegedi adatok, összesen 103 elempár felhasználásával. Az 5.3.9. ábra szerint egy erős pozitív kapcsolat áll fenn e két paraméter között. A determinációs együttható értéke 0,651, ami magasnak mondható, hiszen ennek a kritikus értéke – 103 elem esetén, 1%-os szignifikancia szinten – $r^2 = 0,063$ (Péczeley, 1979), tehát azon null-hipotézis, miszerint a két paraméter között nincs kapcsolat, egyértelműen elvethető. A regressziós egyenes körüli szórás mindössze 0,31 °C.



5.3.9. ábra Az átlagos mért (1999–2000) és a modellezett UHI intenzitás értékei (°C) közötti kapcsolat Szegeden ($n=103$)

A hajdúsági városokban, valamint az 1999–2000-ben Szegeden mért hőmérsékleti adatokat együttesen vizsgálva (118 elempár), egy még szorosabb kapcsolat mutatható ki a modellezett hősziget értékeivel (5.3.10. ábra). Ezt a determinációs együttható magas értéke ($r^2 = 0,781$, $n = 118$) támasztja alá, ennek a kritikus értéke ugyanis 118 elem esetén, 1%-os szignifikancia szinten $r^2 = 0,063$. Tehát azon null-hipotézis, miszerint a két paraméter között nincs kapcsolat, egyértelműen elvethető, továbbá 99%-os biztonsággal állíthatom, hogy a két paraméter között reális kapcsolat áll fenn. Itt a regressziós egyenes körüli szórás mindössze 0,29 °C.



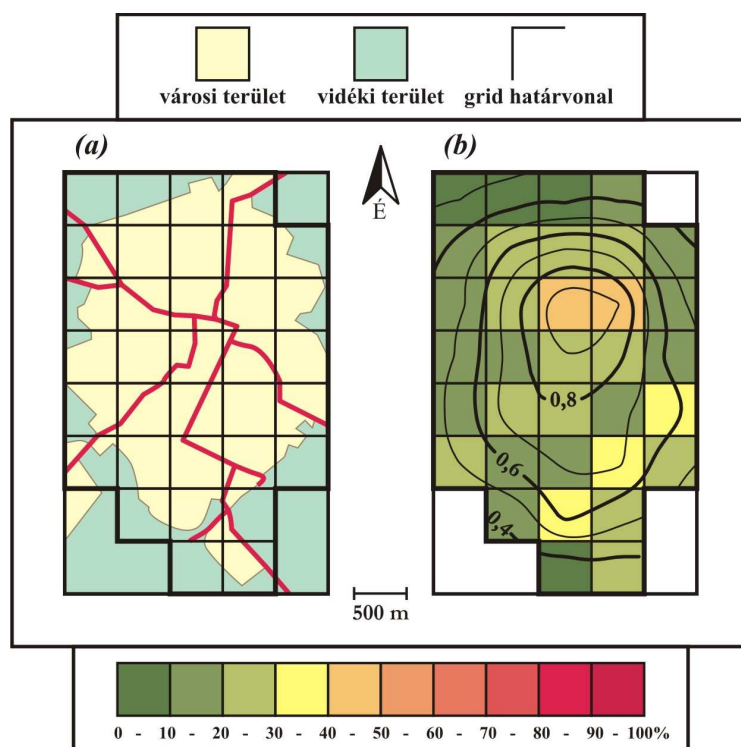
5.3.10. ábra Az átlagos mért és a modellezett UHI intenzitás értékei (°C) közötti kapcsolat ($n=118$)

5.4. Kiterjesztés

A továbbiakban az általános modell-egyenletet kiterjesztem más, különböző méretű, de hasonló földrajzi adottságokkal (hasonló domborzattal és éghajlattal) rendelkező alföldi városra. Mint korábban említettem, ehhez mindössze a városokról készült műholdfelvételekre van szükség, melyből meghatározhatók a modell független változói, tehát a beépítettség, valamint a belőle származtatott mutatók (súlyozva a város szélétől mért távolság logaritmusával).

A vizsgált városok mindegyike a Kárpát-medence belsejében elterülő mintegy 100 000 km² kiterjedésű síkságnak, az Alföldnek a felszínén fekszik (4.1.1. ábra), valamint mind a Péczely által módosított Trewartha-féle D.1 (nedves kontinentális éghajlat, hosszabb meleg évszakkal) klímaövezetbe tartozik (4.1.2. ábra).

A következőkben lakosságszám alapján, nagyság szerinti sorrendbe állítva mutatom be azokat a településeket, melyek területére alkalmaztam a kapott modell-egyenletet. A példák mindegyike a beépítettséget és a modellezett éves átlagos hősziget területi eloszlását mutatja be és elemzi az adott városban.



5.4.1. ábra Karcag jelentősebb útvonalai és a vizsgált terület (a), valamint a beépítettségi értékek (%) és az átlagos UHI intenzitás (°C) területi eloszlása (b)

5.4.1. Karcag modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete

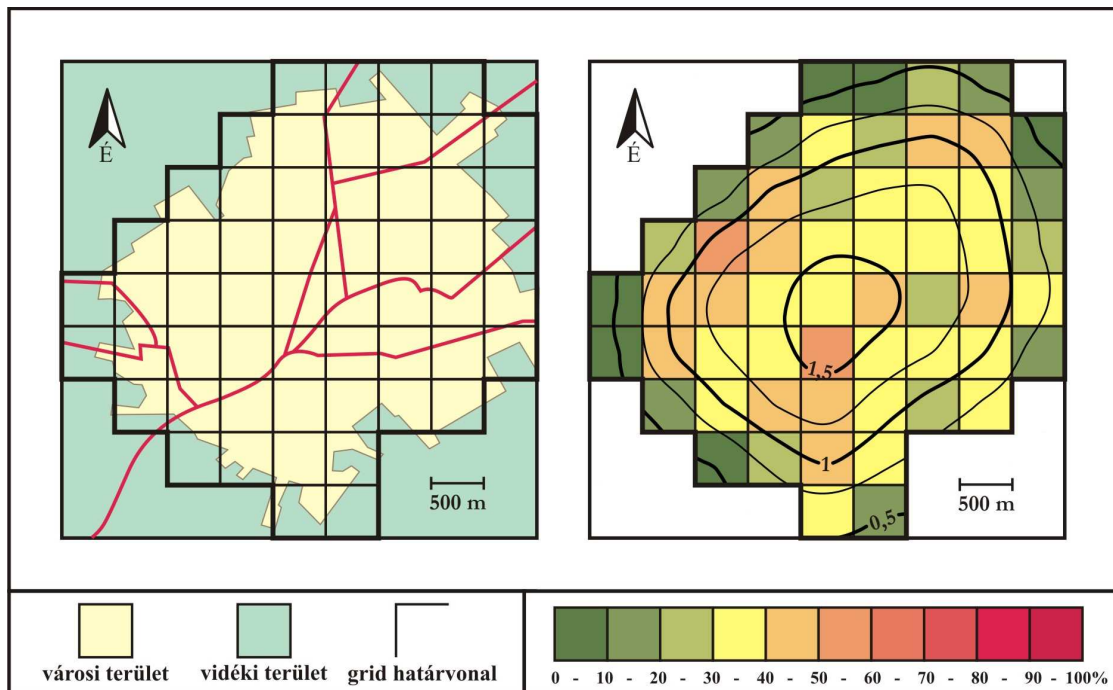
Karcag a legkisebb vizsgált város, lakossága 22 500 fő. Az Alföld középső részén, a Hortobágyi Nemzeti Parktól délre fekszik, a Nagykunság központja (északi szélesség $47^{\circ}18'$, keleti hosszúság $20^{\circ}55'$). A város keleti és déli határát az egyetlen élővize, a kis Hortobágy-Berettyó folyó alkotja. Tengerszint feletti magassága 87 m.

A vizsgált területet 34 cella teszi ki ($8,5 \text{ km}^2$) (5.4.1. a ábra). A modellezett hősziget alakja kissé É-D irányban megnyúlt. A maximális hősziget-intenzitás $0,96^{\circ}\text{C}$, amely a legmagasabb beépítettségű cella (45,5%) felett alakul ki (5.4.1. b ábra). Az egész városban az alacsony B értékek a jellemzőek, ami a város falusias jellegű, laza beépítettségére utal.

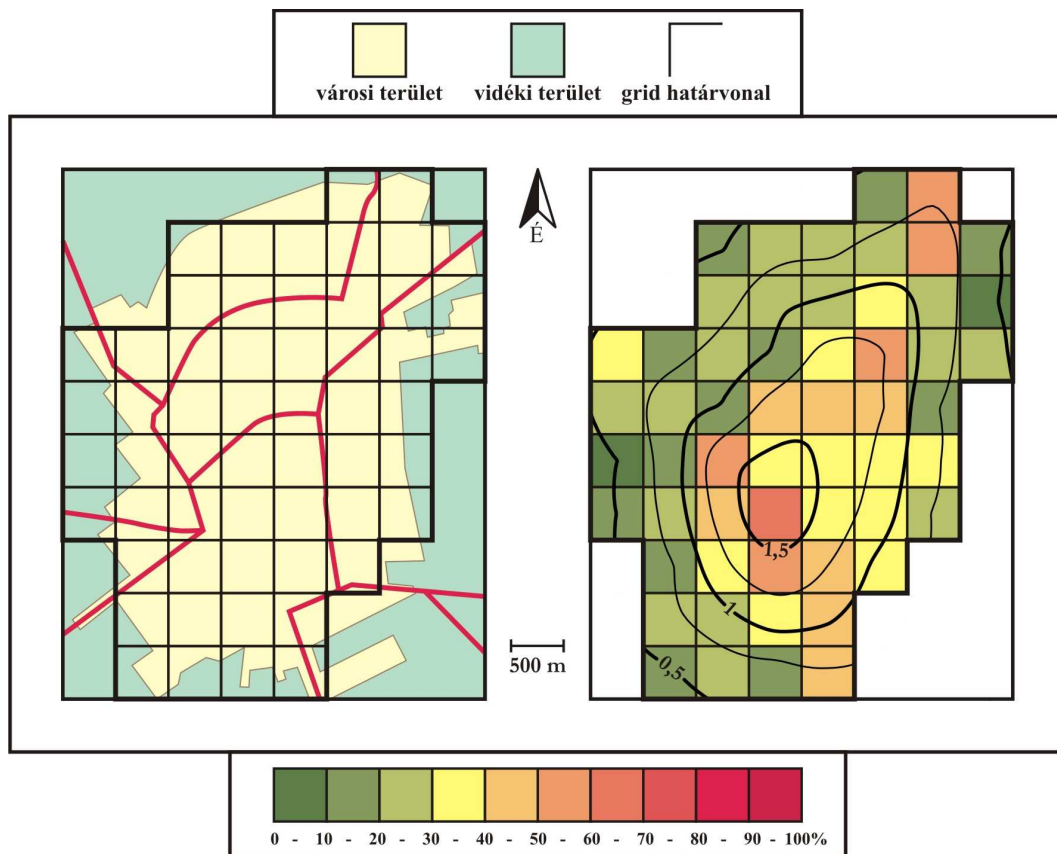
5.4.2. Makó modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete

Népességszám alapján Makó a következő vizsgált város (25 500 fő). A település a Dél-Alföldön, a Maros jobb partján található Szegedtől 32 kilométerre (északi szélesség $46^{\circ}13'$, keleti hosszúság $20^{\circ}29'$). Tengerszint feletti magassága 81–82 m, ezzel Szeged mellett Magyarország legmélyebben fekvő városa.

A vizsgált területet 56 cellát tartalmaz (14 km^2) (5.4.2. a ábra). Az UHI igen szép szabályos formát ölt (5.4.2. b ábra). A hősziget a városközpont felett a legerősebb ($1,60^{\circ}\text{C}$), itt található a legmagasabb beépítettségű cella is (53%). A város aránylag egyenletesen beépített, nagy részén a 30–50%-os B értékek jellemzőek.



5.4.2. ábra Makó jelentősebb útvonalai és a vizsgált terület (a), valamint a beépítettségi értékek (%) és az átlagos UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása (b)



5.4.3. ábra A vizsgált terület és Oroszháza jelentősebb útvonalai (a), valamint a beépítettségi értékek (%) és az átlagos UHI intenzitás (°C) területi eloszlása (b)

5.4.3. Oroszháza modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete

Oroszházán 30 500 fő él, így Békés megye harmadik legnagyobb városa Békéscsaba és Gyula után. A település a Dél-Alföldön helyezkedik el, az úgynevezett "Viharsarok"-ban (északi szélesség 46°34', keleti hosszúság 20°38'). Tengerszint feletti magassága 86 m.

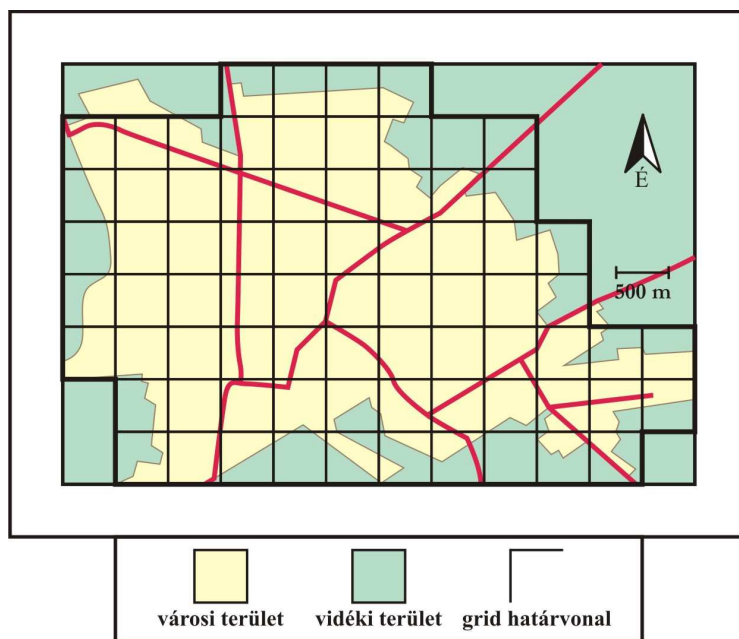
56 cella alkotja a vizsgált területet (14 km²) (5.4.3. a ábra). Bár a legnagyobb modellezett intenzitási érték (1,69 °C) a belváros felett alakul ki (B = 69%), a magas beépítettségű ipari területek (pl. ÉK-en az üveggyár) megnyújtják az izotermákat ÉK-i irányba (5.4.3. b ábra). Lakosságának száma azonos Hajdúböszörményével, mégis a modellezett maximális ΔT értéke lényegesen magasabb. Ez magyarázható azzal, hogy a két város igen eltérő karakterű, ugyanis Hajdúböszörményben a nagy kertek, zöld felületek hangsúlyosak, míg Oroszházán igen számottevőek az ipari területek.

5.4.4. Hódmezővásárhely modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete

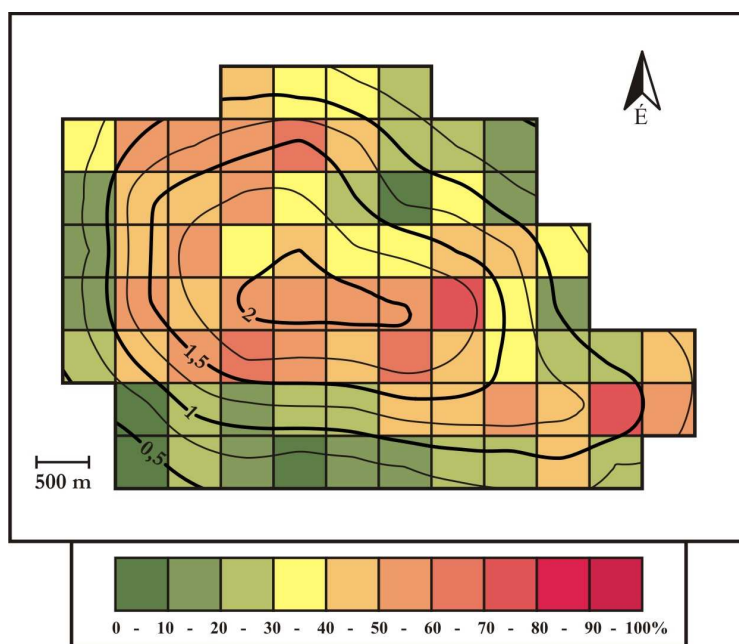
Hódmezővásárhely Budapest után az ország második legnagyobb közigazgatási területével rendelkező városa, de lakossága csak 47 500 fő. Az Alföld déli részén, a Körös-

Maros közti síkságon fekszik (északi szélesség $46^{\circ}25'$, keleti hosszúság $20^{\circ}19'$). Tengerszint feletti magassága 83 m.

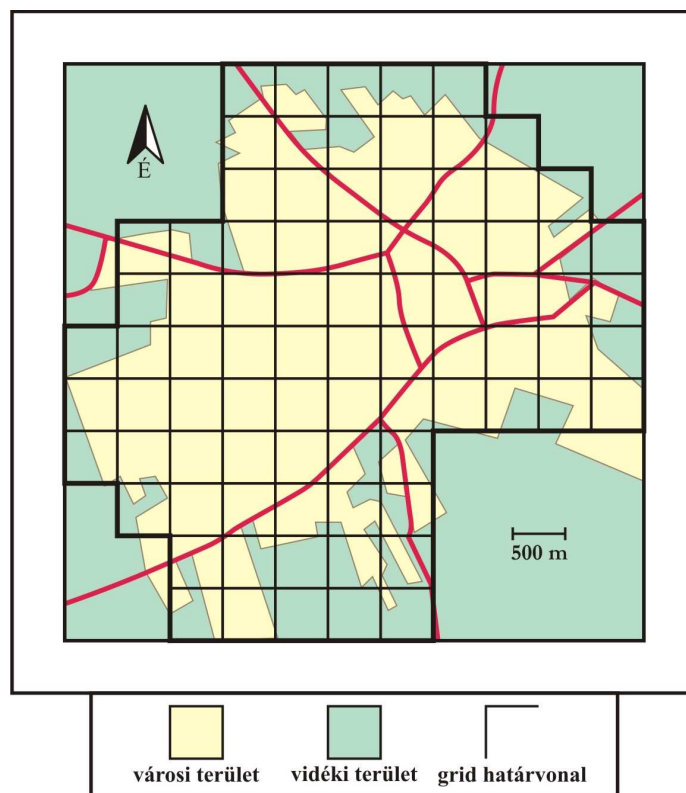
A vizsgált terület 75 cellából áll ($18,75 \text{ km}^2$) (5.4.4. a ábra). A közelítés szerint a legnagyobb ΔT érték ($2,07^{\circ}\text{C}$) a városközpont felett alakul ki (5.4.4. b ábra), viszont a legmagasabb beépítettségű cella nem itt található, hanem ettől keletre (77%) az ipari parkok és a bevásárlóközpontok területén. A város dél-keleti peremén egy nagy ipari létesítmény áll, ami az izotermákat igen erősen torzítja, maga felé húzza.



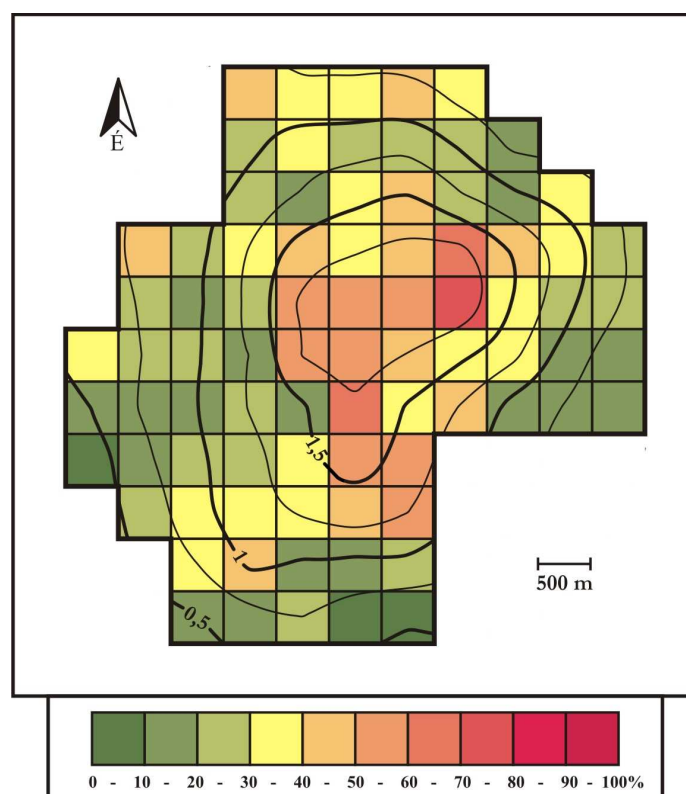
5.4.4.a ábra Hódmezővásárhely jelentősebb útvonalai és a vizsgált terület



5.4.4.b ábra A beépítettségi értékek (%) és az átlagos UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása Hódmezővásárhelyen



5.4.5.a ábra Békéscsaba jelentősebb útvonalai és a vizsgált terület

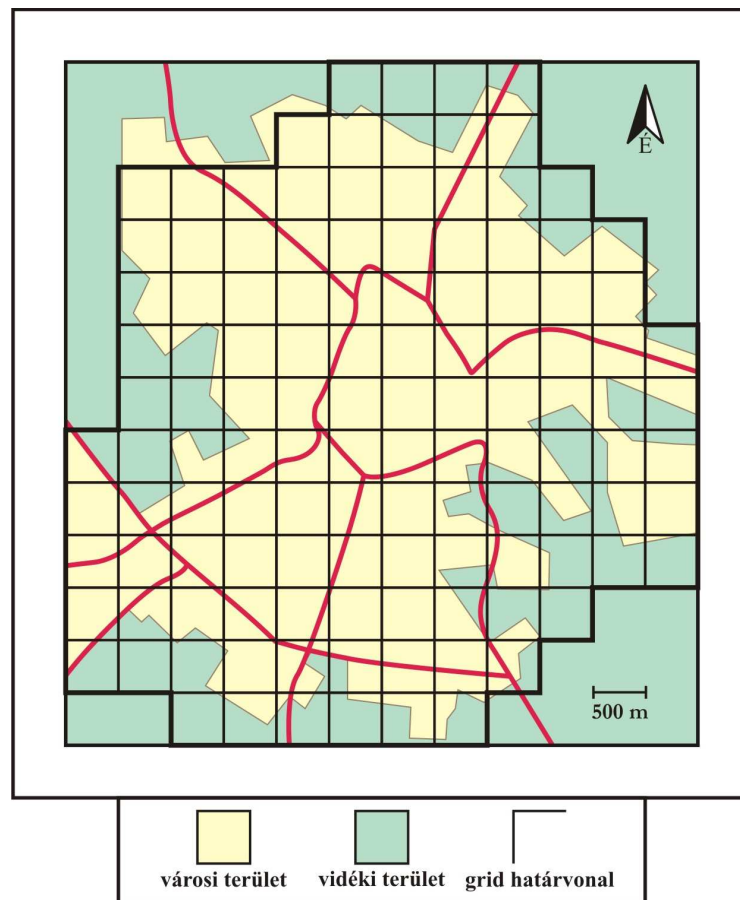


5.4.5.b ábra A beépítettség értékek (%) és az átlagos UHI intenzitás (°C) területi eloszlása Békéscsabán

5.4.5. Békéscsaba modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete

Békéscsabán 65 000 ember él. A város a Tiszántúl délkeleti részén, Békés megye földrajzi középpontjában fekszik (északi szélesség $46^{\circ}40'$, keleti hosszúság $21^{\circ}5'$). Átlagos tengerszint feletti magassága 85–90 méter.

83 cella képezi a vizsgált területet ($20,75 \text{ km}^2$) (5.4.5. a ábra). A modellezett hősziget a városközpont felett a legerősebb ($1,90^{\circ}\text{C}$), itt található a legmagasabb beépítettségű cella is ($72,5\%$) (5.4.5. b ábra). A város peremi területein létesült nagy ipari parkok és bevásárlóközpontok módosítják az izotermák futását.



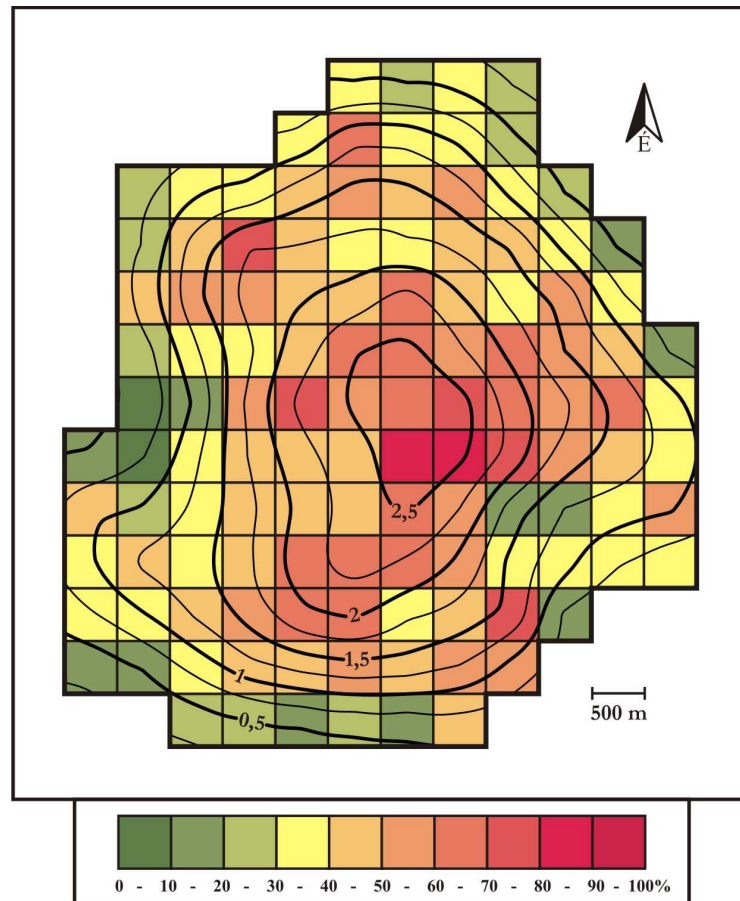
5.4.6.a ábra A Kecskemét jelentősebb útvonalai és a vizsgált terület

5.4.6. Kecskemét modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete

Kecskemét lakossága megközelítőleg fele Debrecen lakosságának, 110 000 fő. A város szinte az ország mértani középpontján fekszik (északi szélesség $46^{\circ}54'$, keleti hosszúság $19^{\circ}42'$), tengerszint feletti magassága 122 m.

A 121 cellából álló vizsgált területen ($30,25 \text{ km}^2$) a modellezett város hőszigete klaszrikus kifejlődésű, egy centrummal rendelkezik a történelmi városközpont felett (5.4.6. a-b

ábra). Itt éri el a ΔT a maximumát, 2,69 °C-ot, a legnagyobb beépítettségű cella felett (78%). A város déli részén nagy burkolt felülettel rendelkező bevásárlóközpontok és ipari parkok fordulnak elő, így a hősziget még itt is eléri a 2–2,25 °C-ot.

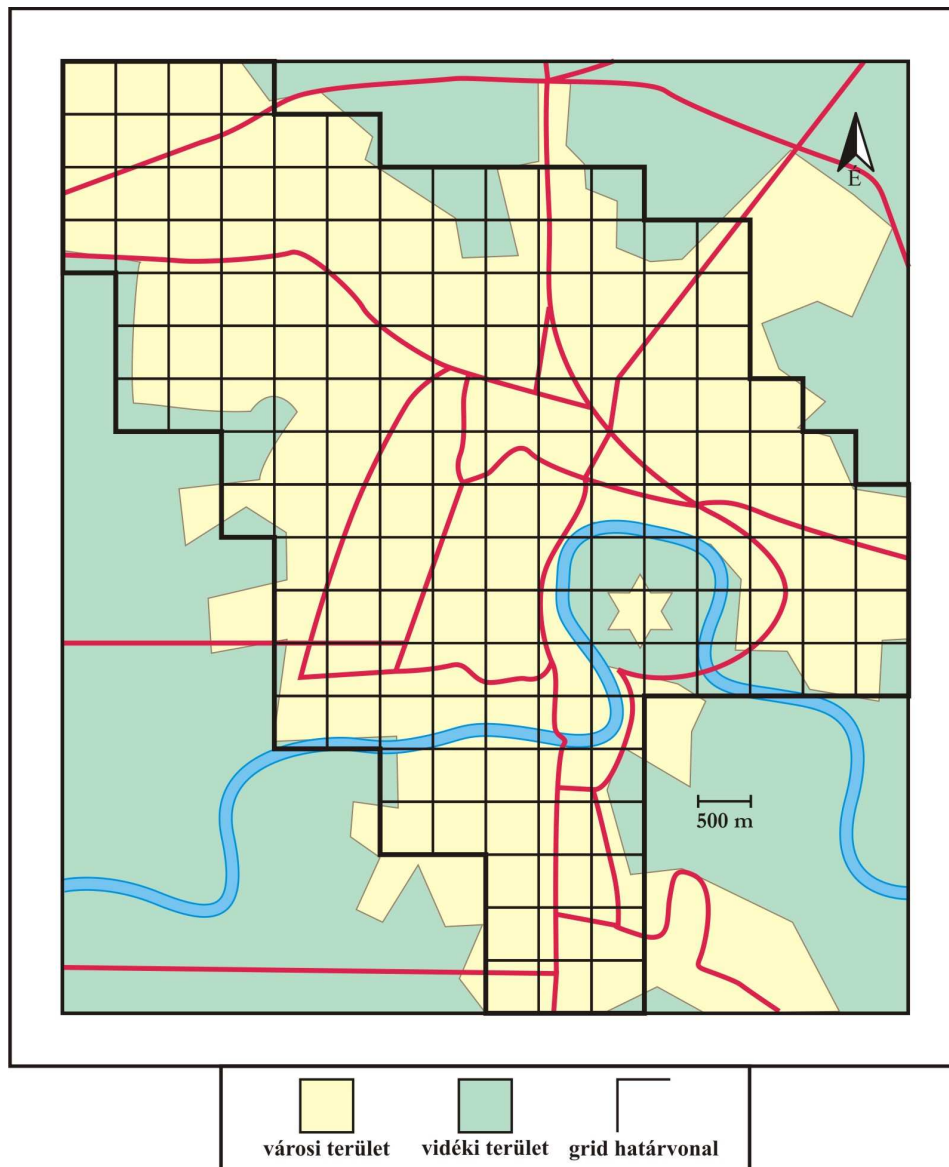


5.4.6.b ábra A beépítettségi értékek (%) és az átlagos UHI intenzitás (°C) területi eloszlása
Kecskeméten

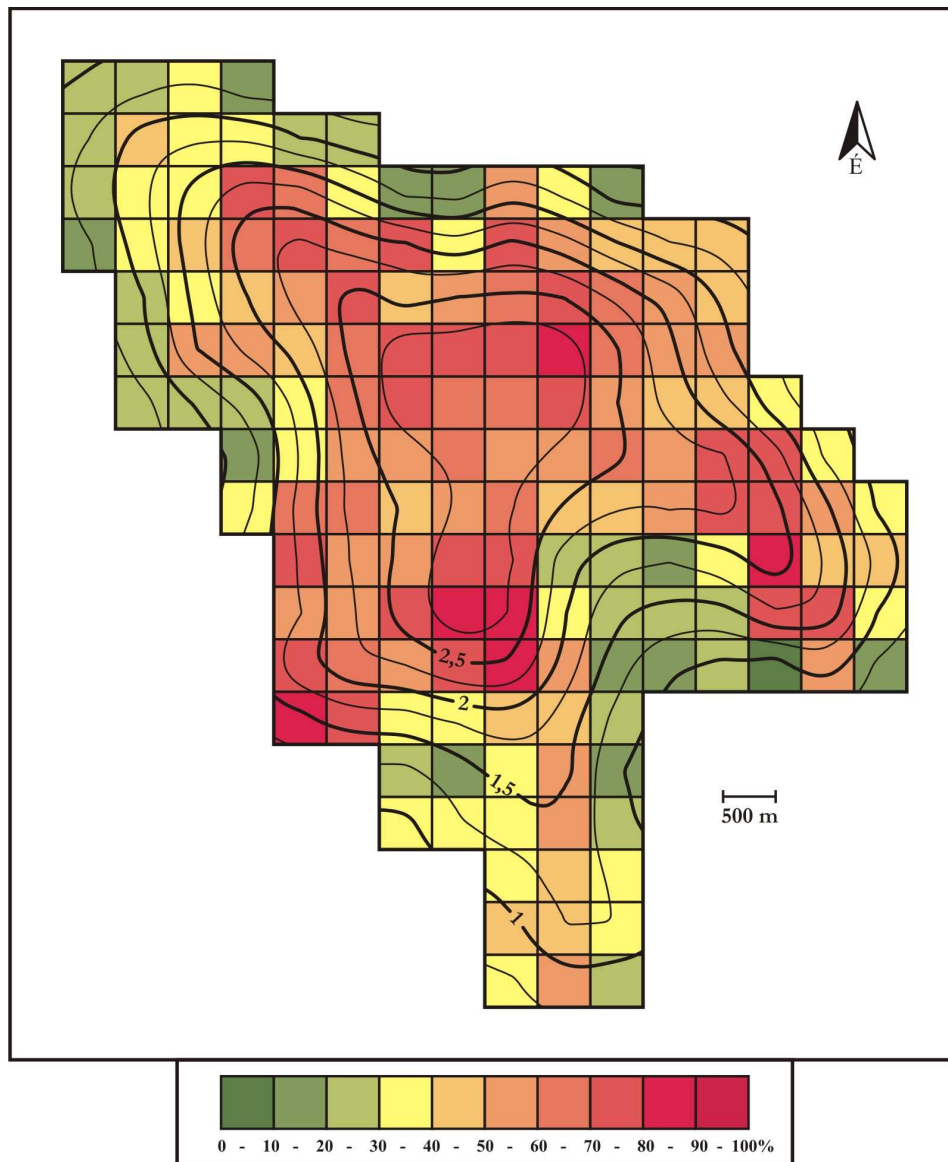
5.4.7. Arad modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete

Arad a 191 500 lakosával hasonló méretű város, mint Szeged és Debrecen. Az Alföld dél-keleti peremén fekszik (északi szélesség 46°10', keleti hosszúság 21°19'), tengerszint feletti magassága 111 m.

A vizsgált terület 158 cellából áll (39,5 km²) (5.4.7. a ábra). Modellezett hőszigete többközpontú, és a város déli részén keresztülhaladó Maros jelentős befolyást gyakorol a környezetére (5.4.7. b ábra). A hősziget maximális értéke Szegedéhez közeli, 2,95 °C. A legmagasabb beépítettségi értékkel rendelkező cella a város dél-nyugati felén a Maros közelében található (85%).



5.4.7.a ábra Arad jelentősebb útvonalai és a vizsgált terület



5.4.7.b ábra A beépítettségi értékek (%) és az átlagos UHI intenzitás (°C) területi eloszlása Aradon

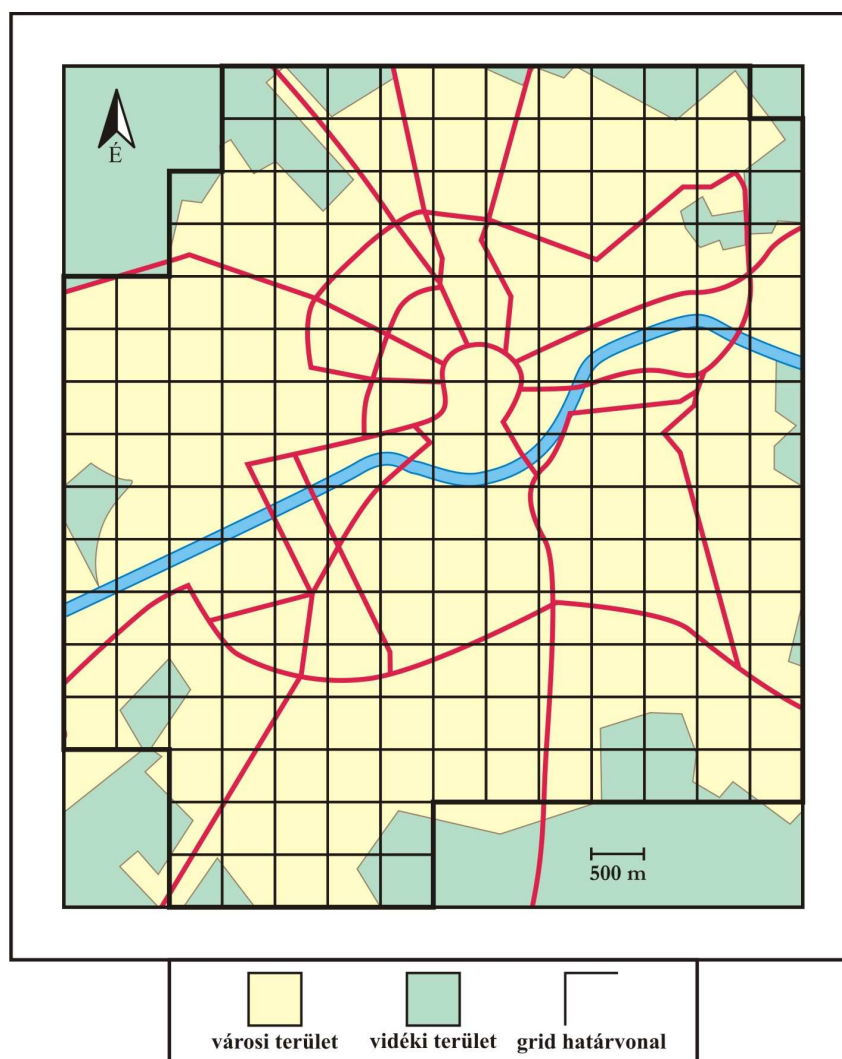
5.4.8. Temesvár modellezett UHI intenzitásának területi szerkezete

308 000 fő lakosával Temesvár a vizsgált városok közül a legnagyobb. Románia harmadik legméretesebb települése, Bukarest és Kolozsvár után. Az Alföld dél-keleti peremén fekszik (északi szélesség $45^{\circ}45'$, keleti hosszúság $21^{\circ}13'$), tengerszint feletti magassága 89 m.

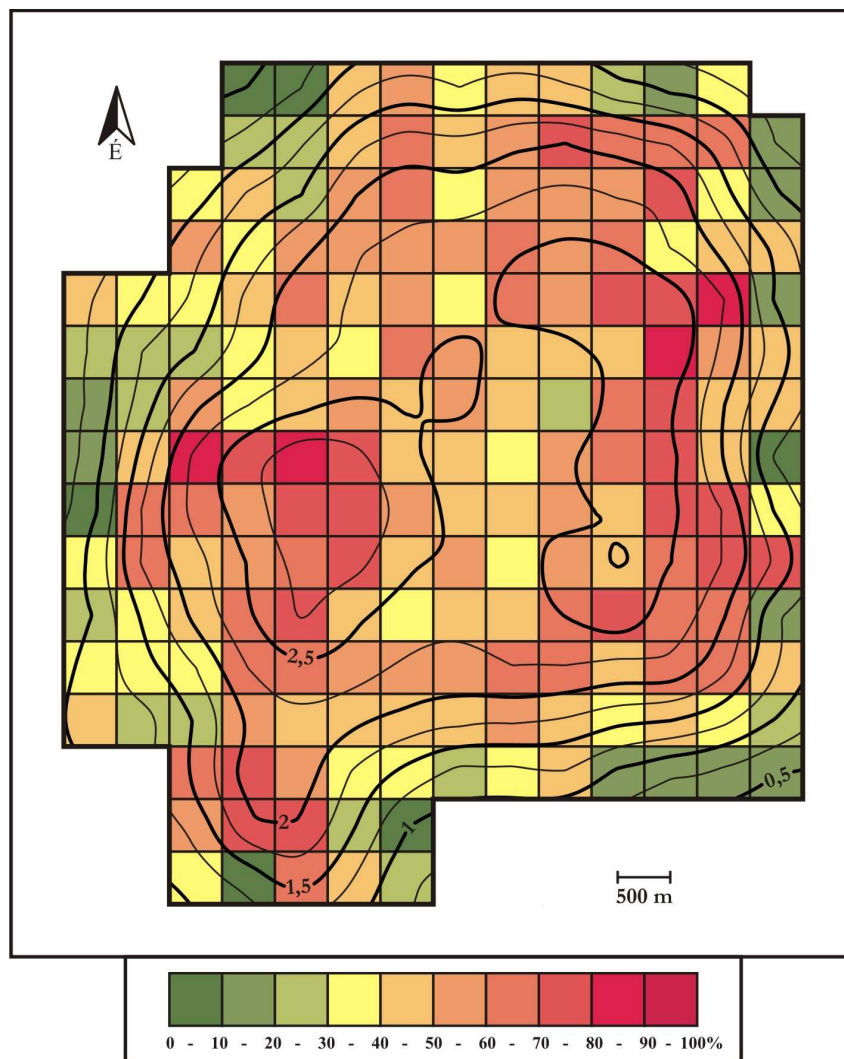
Temesvár esetében az alkalmazott távolság paraméter legnagyobb értéke 3500 m, ami valamelyest nagyobb, mint a modell érvényességének tekintett 3162 m (lásd 5.2.2. táblázat). Ezért tulajdonképpen e település esetében a modell egy kis mértékű extrapolációjáról van szó, ami már valamennyi bizonytalanságot rejt magában. Mégis úgy gondolom, hogy főbb vonalaiban helyesen fog kirajzolódni a modellezett hősziget területi struktúrája (a D

paraméter túllépése mindössze 3 db cellát érint a 193-ból). Ezért – a fenti megjegyzés figyelembe vételével – tájékoztatásul mindenképpen érdemesnek tartom bemutatni az ezzel kapcsolatos eredményt.

A vizsgált terület tehát 193 cellát tartalmaz ($48,25 \text{ km}^2$) (5.4.8. a ábra). A modellezett hősziget maximális értéke Szegedével azonos, $2,97 \text{ }^\circ\text{C}$ (5.4.8. b ábra). A településen két intenzitási csúcs mutatható ki, melyek csak érintik a történelmi városmagot. Ugyanis a belvárosban viszonylag nagy zöld felületek fordulnak elő, így a legmagasabb beépítettségi értékkel rendelkező cella sem ott található, hanem a város keleti felén, ipari területen (84,7%). A ΔT legmagasabb értékei olyan cellákhoz köthetők, amelyek ipari területeken fekszenek.



5.4.8.a ábra A vizsgált terület és Temesvár jelentősebb útvonalai



5.4.8.b ábra A beépítettségi értékek (%) és az átlagos UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása
Temesváron

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatom célja az volt, hogy – szegedi és debreceni hőmérsékleti és felszínborítottsági adatok alapján – egy könnyen hozzáférhető és előállítható bemeneti adatokon alapuló többváltozós modellt készítek az átlagos hősziget területi eloszlásának kezelésére, majd e modellt kiterjesszem más, hasonló éghajlati és földrajzi adottságú városokra, ahol nem állnak rendelkezésre hőmérsékleti mérésadatok.

6.1. Az éves átlagos hősziget és a beépítettség

A városok területén az urbanizált környezet lokális léptékű klímamódosulást eredményez, amelynek legszembetűnőbb megnyilvánulása a városi hősziget (urban heat island – UHI).

A hőmérsékleti adatgyűjtés egy nagyobb, az SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszékén több éve folyó városklíma-kutatási projekt keretében zajlott, amelynek részese voltam magam is.

A hőmérsékleti adatgyűjtés egy nagyobb városklíma projekt keretében történt, amelynek az egyik eredménye, hogy Szegeden a mért éves átlagos maximális UHI intenzitás $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, Debrecenben pedig $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Az éven belüli részidőszakokat tekintve, valamelyest magasabb a nem-fűtési (április 16. – október 15.) időszakra vonatkozó ΔT értéke (Szegeden $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, Debrecenben $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), mint a fűtési (október 16. – április 15.) időszakban (Szegeden $2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, Debrecenben $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$). Az abszolút maximális hősziget-intenzitás Szegeden megközelíti a $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot ($6,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), míg Debrecenben a $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot ($5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Szegeden a legnagyobb hőmérséklet különbséget a város és a környezete között egy kora tavaszi napon mértük (2003. márc. 24.), míg Debrecenben a nyár derekán (2002. júl. 15.).

Az UHI intenzitásának területi eloszlását legnagyobb mértékben a város mesterséges felszínborítottsága befolyásolja. A városi felszín sajátosságait egyszerűen, szemléletesen jellemezi az ún. beépítettségi arány (B vagy B_0), amely jelen dolgozatban egy adott cellára vonatkozóan a mesterséges területek (pl. utak, tetők, parkolók, burkolt felületek stb.) %-os arányát mutatja az adott cella teljes területéhez viszonyítva. Ennek meghatározása LANDSAT műholdfelvételeken történt Normalizált Vegetációs Index kiértékelésével.

6.2. Az éves átlagos maximális hősziget területi eloszlása és kapcsolata a beépítettség-gel

Szegeden a hősziget alakja meglehetősen koncentrikusnak mondható, míg Debrecenben nem ölt ilyen szép szabályos formát. A különbség a városok eltérő szerkezetéből adódik. Szeged szerkezeti sajátosságait a Tiszára, mint tengelyre támaszkodó sugárutas-

körutas rendszer adja. Debrecen szerkezete sajátosan féloldalas, mert a város nyugati részén a lakótelepek jellemzőek, míg a keleti felén a kertes családi házak dominálnak. Mindkét városban erős kapcsolat áll fenn a beépítettség területi eloszlása és a hősziget szerkezete között, a beépítettségi értékek változását a hősziget-intenzitás szorosan követi.

Szegeden erősebb eltérések a szabályos formától csak a város ÉK-i és ÉNy-i részein figyelhetők meg, amelyek egybeesnek a nagy panelépítésű lakótelepek területével. A beépítettség változása a terület Ny-DNy-i részén is hasonló eredményeket okoz. Itt zöldterületek és tavak szakítják meg a városi felszínt és ennek hatására az UHI gyengül. A B paraméter alapján jól kirajzolódik a Tisza alacsony beépítettségű sávja, amivel jól magyarázható a területen kissé megváltozott hőmérsékleti mező.

Debrecen féloldalas szerkezete tükröződik a hősziget területi kifejlődésében, így a maximális UHI intenzitás sem a város geometriai közepén fejlődött ki, hanem attól kissé nyugatra, a belváros néhányemeletes épületei és szűk utcái felett. Nagy DK-i anomáliát okoz az ipartelepek magas beépítettségi aránya. Északon viszont a Nagyerdő alacsonyabb beépítettségi értékei az izotermákat a városközpont felé húzzák.

6.3. A többváltozós hősziget intenzitás-eloszlási modell és elemei

Tekintettel arra, hogy egy adott cella környezetében lévő cellák beépítettsége befolyásolhatja az adott cella hőmérsékletét, újabb paramétereket vezettem be. A B_1 és B_2 származtatott változók (koncentrikus területi kiterjesztés a cellák körül) meghatározhatók a B_0 beépítettségi mutatóból.

Továbbá az is fontos, hogy tudjuk, az adott cella milyen távolságra helyezkedik el a város peremétől. A távolságot tekinthetjük úgy, mint egy olyan paramétert, ami jellemzi egy terület (vagy pont) városon belüli elhelyezkedését. Ugyanis, ha veszünk egy-egy területet a külvárosban és a városközpontban, ahol közel azonos az épületek felépítése és sűrűsége, azt figyelhetjük meg, hogy a belvároshoz viszonyítva a külvárosban egy mérsékelt ΔT tapasztalható.

A Szegedre és Debrecenre vonatkozó összesített adatbázis alapján az éves átlagos UHI intenzitás és a paraméterek értékei közötti kapcsolatkeresésben tanulmányoztam az adatok normalitás-vizsgálatát, majd az összefüggések páronkénti összehasonlító ábrázolása és elemzése következett. Ennek során meghatároztam a felszínparaméter és az UHI közötti sztochasztikus kapcsolat szorosságára vonatkozó lineáris regressziós egyenes képletét, illetve a determinációs együttható (r^2) értékét.

A ΔT , B_0 , B_1 , B_2 , D változók adatai jól közelíthetők normális eloszlással, és a Q-Q diagramokon az értékek transzformáltjai követik a standard normális transzformáltjának megfelelő egyenest. A normalitásra vonatkozó hipotézist a Kolmogorov-Szmirnov próba minden esetben 95%-os megbízhatósági szinten elfogadta. Így a felszínparaméterek és a

ΔT közötti kapcsolat lineárisan jellemezhető a legjobban. A lineáris kapcsolat szorosságát a determinációs együttható magas értékei támasztották alá.

Ahhoz, hogy a távolság (D) és a fentebb említett felszínparaméterek (B_0 és ennek területi kiterjesztései, B_1 , B_2) együttes szerepét figyelembe lehessen venni, létrehoztam néhány új kombinált városi paramétert (B_0' , B_1' , B_2'), ahol a felszíni paraméterek a távolság természetes alapú logaritmusával vannak megszorozva (vagy súlyozva) cellánként.

Ez követően mennyiségileg is meghatároztam a kapott kombinált városi felszínparaméterek és az éves átlagos UHI intenzitás közötti kapcsolatot. Egy általános, felszínparamétereken alapuló többváltozós modellt készítettem Szeged és Debrecen adatai alapján, amely egy közelítést ad az átlagos hősziget területi szerkezetére olyan alföldi városokban, ahol nem áll rendelkezésre hőmérsékleti mérés.

Tehát a többváltozós modellem elemei a következők voltak:

- ΔT , mint függő változó ($^{\circ}\text{C}$),
- B_0' , B_1' , B_2' , mint független változók (dimenzió nélkül).

Vizsgálataim eredményei szerint a városi felszín paraméterei és az UHI átlagos intenzitás közötti kapcsolatok jól leírhatók lineáris függvényekkel, ezért a modell megalkotásakor is lineáris közelítéssel éltem, hasonlóan a Bottyán and Unger (2003) és Bottyán et al. (2005) munkáiban alkalmazottakhoz. Eredményül a következő empirikus modell-egyenletet kaptam az éves átlagos hősziget intenzitásának területi szerkezetére:

$$\Delta T = 0,001032 \cdot B_0' + 0,002455 \cdot B_1' + 0,002629 \cdot B_2' \quad (r^2 = 0,97)$$

A többváltozós modell kifejlesztésénél megvizsgáltam, hogy a beléptetési lineáris regressziós eljárással milyen sorrend alakul ki a távolsággal kombinált felszínparaméterek között. Az első belépő paraméter a B_1' mutató, amely 96,3%-ban határozza meg az éves átlagos UHI intenzitást. Ezt követi a B_2' (96,9%), majd kis különbséggel a B_0' paraméter (97,1%), de mindkét mutató javít a modell megbízhatóságán.

A későbbiekben ezt a – Szeged és Debrecen 207 cellájának értékein alapuló – közös modellt alkalmaztam hasonló éghajlati és domborzati körülményekkel (Alföld) rendelkező, különböző méretű városokra annak kimutatására, hogy e településeken mennyire erős és milyen a mintázata az átlagos hőszigetnek.

6.4. A modell megbízhatósága és korlátai

Szegeden, illetve Debrecenben a mért és a modellezett éves átlagos ΔT különbségtérkép nagy részén a hőmérséklet eltérés $0,5^{\circ}\text{C}$ alatt marad, ami azt tükrözi, hogy a modell jól reprodukálja az eredeti hőmérsékleti mezőt.

A három együtttható szignifikancia szintje kisebb, mint 0,001. A kapott statisztikai mutatók szerint a három paraméternek a hőmérsékleti többlet kialakításában betöltött szerepe 97%. Így az modell-egyenlet alapján készített közelítés megbízhatósága rendkívül jónak mondható.

A modell kiterjesztésekor akkor kapunk megbízható eredményt, ha a vizsgálandó terület értékei azokba az intervallumokba esnek, amiket a modellhez együttesen felhasznált szegedi és debreceni adatokban a paraméterek intervallumhatárai kijelölnek (5.2.2. táblázat). Továbbá a modell akkor ad jó közelítést, ha a vizsgálandó terület földrajzi adottságai hasonlóak a szegedi és debreceni viszonyokhoz.

Teszteltem a kapott modell alkalmazhatóságát, megbízhatóságát két olyan adatbázison, amely független a modellhez felhasznált szegedi és debreceni adatoktól, viszont hasonló földrajzi adottsággal rendelkező városokból származik.

Az egyik adatbázis adatait három alföldi városban – Hajdúböszörményben, Hajdúdorogon és Hajdúnánáson – gyűjtötték 2003. szeptember és 2005. január között. Az éves átlagos mért és modellezett UHI intenzitás közötti együttes összefüggést a három városban rendelkezésemre álló összesen 15 elempár segítségével határoztam meg. Az elempárok átlagos abszolút eltérése kisebb, mint 0,09 °C. A mért és a modellezett ΔT értékei között erős pozitív kapcsolat áll fenn. A lineáris kapcsolat szorosságát a determinációs együtttható magas értéke ($r^2 = 0,816$, $n = 15$) támasztja alá, ennek a kritikus értéke ugyanis 15 elem esetén, 1%-os szignifikancia szinten $r^2 = 0,397$ ($r = 0,63$). Tehát azon null-hipotézis, miszerint a két paraméter között nincs kapcsolat, egyértelműen elvethető, továbbá 99%-os biztonsággal állíthatom, hogy a két paraméter között reális kapcsolat áll fenn. A regressziós egyenes körüli szórás csupán 0,11 °C.

A másik adatbázis adatait Szegeden gyűjtötték egy éves mérési periódusban 1999. március – 2000. február között. Megvizsgáltam az 1999–2000-ben mért ΔT és a modellezett hősziget kapcsolatát, összesen 103 elempár felhasználásával. Egy erős pozitív kapcsolat áll fenn e két paraméter között. A determinációs együtttható értéke 0,651, ami magasnak mondható, hiszen ennek a kritikus értéke – 103 elem esetén, 1%-os szignifikancia szinten – $r^2 = 0,063$, tehát azon null-hipotézis, miszerint a két paraméter között nincs kapcsolat, egyértelműen elvethető. A regressziós egyenes körüli szórás csak 0,31 °C.

A hajdúsági városokban, valamint az 1999–2000-ben Szegeden mért hőmérsékleti adatokat együttesen vizsgálva (118 elempár), egy még szorosabb kapcsolat mutatható ki a modellezett hősziget értékeivel. Ezt a determinációs együtttható magas értéke ($r^2 = 0,781$, $n = 118$) támasztja alá, ennek a kritikus értéke ugyanis 118 elem esetén, 1%-os szignifikancia szinten $r^2 = 0,063$. Tehát azon null-hipotézis, miszerint a két paraméter között nincs kapcsolat, egyértelműen elvethető, továbbá 99%-os biztonsággal állíthatom, hogy a két paraméter között reális kapcsolat áll fenn. Itt a regressziós egyenes körüli szórás mindössze 0,29 °C.

6.5. Kiterjesztés

Az általános modell-egyenletet kiterjesztettem más, különböző méretű, de hasonló földrajzi adottságokkal rendelkező (hasonló domborzattal és éghajlattal) alföldi városra: Arad, Békéscsaba, Hódmezővásárhely, Karcag, Kecskemét, Makó, Orosháza, Temesvár. Mint korábban említettem, ehhez mindössze a városokról készült műholdfelvételekre volt szükség, melyekből meghatározhatók a modell független változói, tehát a beépítettség, valamint a belőle származtatott mutatók (súlyozva a város szélétől mért távolság természetes alapú logaritmusával).

A következőkben lakosságszám alapján, nagyság szerinti sorrendbe állítva mutatom be azokat a településeket, melyek területére alkalmaztam a kapott modell-egyenletet.

A legkisebb vizsgált városban, Karcagon a modellezett hősziget alakja kissé É-D irányban megnyúlt. A maximális hősziget-intenzitás $0,96\text{ }^{\circ}\text{C}$, amely a legmagasabb beépítettségű cella felett alakul ki (45,5%). Az egész városban az alacsony B értékek a jellemzőek, ami a város falusias jellegű, laza beépítettségére utal.

Az UHI igen szép szabályos formát ölt Makón. A hősziget a városközpont felett a legerősebb ($1,60\text{ }^{\circ}\text{C}$), itt található a legmagasabb beépítettségű cella is (53%). A város aránylag egyenletesen beépített, nagy részén a 30–50%-os B értékek jellemzőek.

Bár a legnagyobb modellezett intenzitási érték ($1,69\text{ }^{\circ}\text{C}$) Orosházán a belváros felett alakul ki ($B = 69\%$), a magas beépítettségű ipari területek (pl. ÉK-en az üveggyár) megnyújtják az izotermákat ÉK-i irányba. Lakosságának száma (30 500 fő) azonos Hajdúböszörményével, mégis a modellezett maximális ΔT értéke lényegesen magasabb. Ez magyarázható azzal, hogy a két város igen eltérő karakterű, ugyanis Hajdúböszörményben a nagy kertek, zöld felületek hangsúlyosak, míg Orosházán igen számottevőek az ipari területek.

Hódmezővásárhelyen a közelítés szerint a legnagyobb ΔT érték ($2,07\text{ }^{\circ}\text{C}$) a városközpont felett alakul ki, viszont a legmagasabb beépítettségű cella nem itt található, hanem ettől keletre (77%) az ipari parkok és a bevásárlóközpontok területén. A város dél-keleti peremén egy nagy ipari létesítmény áll, ami az izotermákat igen erősen torzítja, maga felé húzza.

A modellezett hősziget Békéscsabán is a városközpont felett a legerősebb ($1,90\text{ }^{\circ}\text{C}$), itt található a legmagasabb beépítettségű cella is (72,5%). A város peremi területein létesült nagy ipari parkok és bevásárlóközpontok módosítják az izotermák futását.

Kecskeméten a modellezett város hőszigete klasszikus kifejlődésű, egy centrummal rendelkezik a történelmi városközpont felett. Itt éri el a ΔT a maximumát, $2,69\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot, a legnagyobb beépítettségű cella felett (78%). A város déli részén nagy burkolt felülettel rendelkező bevásárlóközpontok és ipari parkok fordulnak elő, így a hősziget még itt is eléri a $2\text{--}2,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot.

Arad hasonló méretű város, mint Szeged és Debrecen. Modellezett hőszigete többközpontú, és a város déli részén keresztülhaladó Maros jelentős befolyást gyakorol a környezetére. A hősziget maximális értéke Szegedéhez közeli, $2,95\text{ }^{\circ}\text{C}$. A legmagasabb beépítettségi értékkel rendelkező cella a város dél-nyugati felén a Maros közelében található (85%).

Temesvár vizsgált területe már közel 50 km^2 . A város esetében a modell egy kis mértékű extrapolációjáról van szó. A modellezett hősziget maximális értéke Szegedével azonos, $2,97\text{ }^{\circ}\text{C}$. A településen két intenzitási csúcs mutatható ki, melyek csak érintik a történelmi városmagot. Ugyanis a belvárosban viszonylag nagy zöld felületek fordulnak elő, így a legmagasabb beépítettségi értékkel rendelkező cella sem ott található, hanem a város keleti felén, ipari területen (84,7%). A ΔT legmagasabb értékei olyan cellákhoz köthetők, amelyek ipari területeken fekszenek.

6.6. Kitekintés

Az eredményeknek nagy lehet a gyakorlati jelentősége, hiszen a hőmérséklet különbség a belváros és a külterületek között még egy olyan nagyságú városban is, mint Szeged elérheti akár a $6\text{--}7\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot, átlagosan pedig a $2\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot is, ráadásul a városon belül szintén nagy területi különbségek alakulhatnak ki. A modell-egyenletből kapott átlagos területi UHI szerkezeteknek az ismerete a későbbiekben hasznos alapinformáció lehet a városok fejlesztési terveinek kialakításakor. Célszerű figyelembe venni már tervezésekor is az épületek klímamódosító hatásait, illetve a zöld felületek növelésével, az épülettömbök megfelelő tagolásával csökkenthetők a hőtöbbletből származó káros hatások.

7. SUMMARY

The aim of my study was to create a multiple-parameter model based on easily accessible and producible input data for the approximation of the spatial distribution of the mean heat island using temperature and surface coverage data of Szeged and Debrecen. A further aim is to extend the general model to other, different-sized settlements having similar climatic and geographic conditions but no temperature measurements available.

7.1. The annual mean maximum heat island and the built-up ratio

Urban environments differ significantly from the surrounding countryside, which causes a local-scale change of climate, the formation of the urban heat island (UHI).

The temperature data collection was carried out within the scope of a bigger urban climate project, which has been in progress in the Department of Climatology and Landscape Ecology of the University of Szeged for years. I myself had a part in this project.

For the study of maximum UHI intensity in Szeged and Debrecen, the required temperature data were collected by measurement cars driving on assigned routes at the same time (29 occasions) in the two cities, in a one-year period between April 2002 and March 2003. In Szeged the measured annual mean maximum UHI intensity was 3.0 °C, in Debrecen it was 2.4 °C. As for the seasons, in the non-heating period (16 April – 15 October) ΔT was a bit higher (in Szeged: 3.0 °C, in Debrecen: 2.5 °C) than in the heating period (16 October – 15 April, in Szeged: 2.9 °C, in Debrecen: 2.3 °C). In Szeged the largest heat island intensity was near 7 °C (6.8 °C), in Debrecen about 6 °C (5.8 °C). In Szeged the biggest temperature difference between the city and its surroundings was measured in an early spring day (24 March 2003), in Debrecen it was in the middle of summer (15 July 2002).

UHI intensity and its pattern are influenced mostly by the covered surface of the city. A simple, visual description of the urban surface is given by the built-up ratio (B or B_0). For a given cell it shows the percentage of the built-up areas (streets, pavements, parking lots, building roofs, etc.) compared to the area of the whole cell. This parameter was determined by the assessment of the Normalized Vegetation Index (NDVI) on LANDSAT satellite images.

7.2. The spatial distribution of the annual mean maximum heat island and its relationship with the built-up ratio

In Szeged the structure of the heat island is rather concentric, but in Debrecen it is not so regular. The difference derives from the different structures of the two cities. Szeged has

one centre and an avenue-boulevard system, and the river Tisza flows across the city. The structure of Debrecen is lop-sided, because on the western part of the city there are concrete housing blocks, while the eastern part consists mainly of family homes with gardens. In both cities there is strong connection between the spatial distribution of the built-up ratio and the structure of the heat island, with the temperature intensity closely following the built-up ratio.

In Szeged significant deviations from the regular shape only occur in the north-eastern and in the north-western parts of the city, which overlap with the area of the big concrete housing blocks. In the western and south-western parts of the city the variation of the built-up ratio causes similar results. Here, green areas and lakes break up the artificial surface, which causes weaker UHI. Parameter B clearly shows the low built-up zone of river Tisza, which accounts for the slight difference in the temperature field in the area.

The lop-sided structure of Debrecen is visible in the spatial distribution of the heat island, so the maximum UHI intensity is to be found above the multi-storey buildings west of the geometrical centre of the city. The large south-eastern anomaly is caused by the high built-up ratio of the industrial parks. On the north the low built-up values of Nagyerdő pull the isotherms in the direction of the city centre.

7.3. The multiple-parameter model

It is important to consider the built-up conditions around the cells, because the wider surroundings can influence the temperature of a given cell. In order to take the effect of the surroundings into account, I introduced the derived variables B_1 , B_2 (concentric areal extensions around the cells) calculated from the built-up ratio B_0 .

Furthermore, it is important to know the distance of a given cell from the city boundary. The distance can be regarded as a parameter that characterizes the location of an area (or point) inside the city. Comparing areas with the same building structure and design in the suburbs and in the centre, we find a reduced ΔT in the suburbs compared to that in the centre.

The data of the ΔT , B_0 , B_1 , B_2 , D variables can be approximated with a normal distribution. The Kolmogorov-Smirnov test accepted the hypothesis concerning normality in all cases at the 95% confidence level. Thus, the connection between the surface parameters and ΔT can be best described as linear. The strength of the linear relationship was supported by the large values of the coefficient of determination.

In order to take into account the roles of the distance (D) and the above mentioned surface parameters (B_0 and its areal extensions, B_1 , B_2), I introduced new combined urban parameters (B_0' , B_1' , B_2'), multiplying (or weighing) the surface parameters by the logarithm of distance of each cell.

Then I quantified the connection between the combined urban surface parameters and the annual mean UHI intensity. Based on data from Szeged and Debrecen, I created a general multiple-parameter model which gives an estimation of the mean ΔT patterns in other settlements situated on a plain with no temperature measurements available.

The elements of my multiple-parameter model are the following:

- ΔT , as a variable ($^{\circ}\text{C}$),
- B_0' , B_1' , B_2' , as invariable parameters ('dimensionless').

According to the results of my investigation the connections between the urban surface parameters and the mean UHI intensity can be described well with linear functions, so linear approach was used by the creation of a model, similarly to Bottyán and Unger (2003) and Bottyán et al. (2005). For the spatial distribution of the annual mean UHI intensity I found the following empirical model-equation:

$$\Delta T = 0.001032*B_0' + 0.002455*B_1' + 0.002629*B_2' \quad (r^2 = 0.97)$$

By the creation of a multiple-parameter model the order of combined urban parameters was examined by stepwise linear regression analysis. The first entrant was the B_1' parameter, which determined the annual mean UHI intensity in 96.3%, the next was the B_2' (96.9%) and the last was the B_0' (97.1%), but both parameters improved the reliability of the model.

My model, which is based on the values of cells of Szeged and Debrecen, was applied in different sized settlements having similar geographical conditions (Alföld) for simulating the magnitude and pattern of mean heat islands.

7.4. The reliability and limitations of the model

In Szeged and in Debrecen the temperature difference is less than 0.5°C on most of the anomaly-map of the observed and the modeled annual mean ΔT , which means the model reproduces the original temperature field correctly.

The significance levels of the three coefficients are less than 0.001. According to the obtained statistical figures, the three invariable parameters explain 97% of the variation in the magnitude and spatial distribution of the temperature excess in the studied cities, so the reliability of this model-equation is out-standing.

When extending the model, reliable results are obtained if the parameters of the investigated area fall within the intervals determined by the parameters of Szeged and Debrecen used for the model (*Table 5.2.2.*).

Furthermore, the model provides an appropriate estimation if geographical conditions of the investigated area are similar to those of Szeged and Debrecen.

I tested the reliability and applicability of the model on two independent databases from the data from Szeged and Debrecen (2002–2003), using data from settlements with similar environmental conditions.

The data of either database were collected in three towns (Hajdúböszörmény, Hajdúdorog and Hajdúnánás) situated on a flat area, between September 2003 and January 2005. The relationship between the observed and estimated annual mean UHI intensity was determined by 15 pairs of elements in these three towns. The mean absolute deviation of the element pairs was less than 0.09 °C. There is a strong positive relationship between the observed and estimated ΔT values. The strength of the linear relationship is supported by the large value of the coefficient of determination ($r^2 = 0.816$, $n = 15$), since at my number of elements (15) the relationship is real at 1% significance level at $r^2 = 0.397$ ($r = 0.63$). Thus, the null-hypothesis, that there is no connection between the two parameters, can be clearly rejected; moreover, I can state with 99% certainty that realistic connection exists between the two parameters. Deviation around the regression linear is only 0.11 °C.

The data of other database were collected in Szeged in a one-year period between March 1999 and February 2000. The relationship between the observed (1999–2000) and the estimated heat island was examined by 103 pairs of elements. There is a strong positive relationship between the observed and estimated ΔT values. The value of the coefficient of determination is large (0.651), since at my number of elements (103) the relationship is real at 1% significance level at $r^2 = 0.063$. Thus, the null-hypothesis, that there is no connection between the two parameters, can be clearly rejected. Deviation around the regression linear is just 0.31 °C.

When the measured data examined together (118 pairs of elements) from three towns (Hajdúböszörmény, Hajdúdorog and Hajdúnánás) and from Szeged (1999–2000), then a stronger relationship was detected with the data of the estimated UHI. The strength of the linear relationship is supported by the large value of the coefficient of determination ($r^2 = 0.781$, $n = 118$), since at my number of elements (118) the relationship is real at 1% significance level at $r^2 = 0.063$. Thus, the null-hypothesis, that there is no connection between the two parameters, can be clearly rejected; moreover, I can state with 99% certainty that realistic connection exists between the two parameters. Here the deviation around the regression linear is only 0.29 °C.

7.5. Extension

My general model was extended to other, different-sized settlements, where the environmental situation, like topography and climate, is similar to that of Szeged and Debrecen: Arad, Békéscsaba, Hódmezővásárhely, Karcag, Kecskemét, Makó, Orosháza and Temešvár. As mentioned earlier, only certain Landsat satellite images of the settlements were

necessary, from which the built-up ratio and its areal extensions (weighting with the log-distance from the city border) were determined as independent variables for this purpose.

Hereafter, settlements are showed in order of population size, where the given model-equation was used.

In the smallest city, Karcag, the simulated UHI form is slightly stretched out in a S-N direction. The UHI maximum is 0.96 °C, which develops above the most densely built-up cell (45.5%). In the whole city low B values are typical, it alludes to the village-like diffuse built-up.

The structure of UHI is really regular in Makó. The heat island is the largest (1.60 °C) above the city centre, where the most densely built-up cell (53%) can be found. The city is relatively evenly built-up 30-50% B0 values are typical in most parts.

The largest simulated intensity value (1.69 °C) develops above the centre in Orosháza (B0 = 69%), but highly built-up industrial parks elongate the isotherms in the direction of N-E. Its size of population is equivalent to the number of inhabitants in Hajdúböszörmény (30 500 people), even so in Orosháza the value of modeled maximum ΔT is much higher than in Hajdúböszörmény. It is explicable with the different character of cities, because in Hajdúböszörmény big gardens and green surfaces are typical, while in Orosháza there are considerable industrial areas.

According to the approximation in Hódmezővásárhely the biggest ΔT value evolves above the centre, however the most densely built-up cell (77%) is in the areas of industrial parks and hypermarkets in the eastern part of the city. On the south-eastern confines of the city there is a gross factory, which pulls the isotherms.

Also in Békéscsaba the modeled heat island is the largest above the centre (1.90 °C), here is the most densely built-up cell (72.5%). On the confines of the city there are big industrial parks and hypermarkets, which modify the form of isotherms.

Kecskemét has a rather regular UHI development with a centre in the historical city core (reaching 78% built-up ratio) and with a largest ΔT of about 2.7°C. In the southern part of the city there are great industrial parks and hypermarkets with big covered surface, so here the UHI reaches 2–2.25 °C.

Arad is of similar size as Szeged and Debrecen. Its modeled heat island has more centers, the Maros river flows across the southern part of the city, so it affects the temperature of its surroundings. The maximum ΔT value is 2.95 °C (similarly to Szeged). The cell with the highest built-up value is in the south-western part of the city (85%).

The investigated area of Temesvár is almost 50 km². In the case of this city the model has a bit of extrapolation. The maximum value of the modeled UHI is the same as in Szeged (2.97 °C). In the settlement there are two intensity tops, which both reach the historical core but do not cover it, because in the centre there are relatively big green surfaces.

Thus the densest cell is not here, it is in an industrial park in the eastern part of the city (84.7%). The highest ΔT values belong to industrial areas.

7.6. Conclusion

The results may have great practical significance, since the temperature difference between the city centre and the rural areas reaches 6-7 °C, on average 2-3 °C in a big city like Szeged. The presented empirical model can be regarded as a useful tool for estimating the mean heat island patterns for cities situated on a plain and in the same climate type. The knowledge of the estimated structure of mean UHI may provide useful basic information for the development projects of neighborhoods or cities. It is useful to consider the climate-modifying effect of buildings in the planning period. The enlargement of green surfaces and the suitable partition of buildings may decrease the injurious effect of heat excess.

IRODALOM

- Alcoforado, M.-J. and Andrade, H., 2006: Nocturnal heat island in Lisbon (Portugal): main features and modelling attempts. *Theoretical and Applied Climatology* 84, 151–159.
- Arnfield, A.J. and Grimmond, C.S.B., 1998: An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling. *Energy and Buildings* 27, 61–68.
- Bacsó N., 1958: Budapest és környékének éghajlata. *Budapest természeti képe*. Akadémiai Kiadó, Budapest. 353–418.
- Balázs B. és Unger J., 2007: A hősziget statisztikai modellezése geoinformatikai alkalmazásokkal. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek No. 21., ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest*, 40–44.
- Balázs B., Gál T. és Unger J., 2004: Az átlagos maximális városi hősziget-intenzitás statisztikai modellezése a település felszínparaméterei segítségével. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek No. 19., ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest*, 158–161.
- Balázs B., Gál T., Zboray Z. and Sümeghy Z., 2005a: Modelling the maximum development of urban heat island with the application of GIS based surface parameters in Szeged (Part 1): Temperature, surveying and geoinformatical measurement methods. *Acta Climatologica Univ Szegediensis* 38–39, 5–16.
- Balázs B., Gál T., Zboray Z., Sümeghy Z. és Unger J., 2005b: Háromdimenziós adatok előállítása térinformatikai módszerekkel Szeged városklíma kutatásához. *A környezettudomány elmélete és gyakorlata, Tudományos konferencia, Szeged*. CD.
- Balázs B., Geiger J., Unger J., Sümeghy Z. és Gál T., 2006: Geoinformatikai alkalmazások a hősziget statisztikai modellezésében. 3. *Magyar Földrajzi Konf, Budapest*, CD.
- Balázs, B., Geiger, J. and Sümeghy, Z., 2007: Annual mean urban heat island versus 2D surface parameters: modelling, validation and extension. *Acta Climatologica Univ. Szegediensis* 40–41, 5–15.
- Balázs, B., Unger, J., Gál, T., Sümeghy, Z., Geiger, J. and Szegedi, S., 2008: Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modeling, verification and extension. *Meteorological Applications* (in press)
- Balchin, W.G.V. and Pye, N., 1947: A micro-meteorological investigation of Bath and the surrounding district. *Quart J Roy Meteorol Soc* 73, 297–319.
- Baros, Z., 2006: Research of the characteristics of noise propagation under various weather conditions in the northern part of Debrecen (East Hungary). *Preprints 6th Int Conf on Urban Climate, Göteborg, Sweden*, 100–103.
- Baros, Z. and Szegedi, S., 2005: Comparative urban heat island measurements in various sized settlements in Hungary. *Annalen der Meteorologie* 41, 17th Int Congr of Biometeorology, Garmish Partenkirchen, Germany, 180–183.
- Bartholy, J., Pongrácz, R. and Dezső, Zs., 2003: Application of satellite information to urban climatology. 83rd American Meteorol. Soc. (AMS) Annual Meeting. CD, P1.10.
- Bartholy J., Pongrácz R. és Dezső Zs., 2005: A hazai nagyvárosok hősziget hatásának elemzése finomfelbontású műholdképek alapján. "AGRO-21" *Füzetek, Klímaváltozás – Hatások – Válaszok* 44, 32–44.
- Becsei J., 2001: *Fejezetek az általános társadalmi földrajz tanulmányozásához*. Ipszilon Kiadó, Budapest, 109–137.
- Boruzs T. és Nagy T., 1999: *A város hatása a klímaelemekre*. JATE szakdolgozat (kézirat), Szeged.
- Bottyán, Z. and Unger, J., 2003: A multiple linear statistical model for estimating mean maximum urban heat island. *Theor Appl Climatol* 75, 233–243.
- Bottyán, Z., Balázs, B., Gál, T. and Zboray, Z., 2003: A statistical approach for estimating mean maximum urban heat excess. *Acta Climatol Univ. Szegediensis* 36–37, 17–26.
- Bottyán Zs., Unger J., Szegedi S. és Gál T., 2004: A városi hőmérsékleti többlet területi eloszlásának statisztikus modellezése a beépítettség paraméter alapján, Szegeden és Debrecenben. *II. Magyar Földrajzi Konferencia, Szeged*, CD.
- Bottyán, Z., Kircsi, A., Szegedi, S. and Unger, J., 2005: The relationship between built-up areas and the spatial development of the mean maximum urban heat island in Debrecen, Hungary. *Int. J. Climatology* 25, 405–418.
- Chandler, T.J., 1960: Wind as a factor of urban temperatures – a survey in north-east London. *Weather* 15, 204–213.
- Chandler, T.J., 1962: Temperature and humidity traverses across London. *Weather* 17, 235–241.
- Chandler, T.J., 1967: London's heat-island. *Proceed. of the 3rd Int. Biometeorol. Congr. Pau, France*. 589–597.
- Chandler, T.J. and Fox, 1974: *3000 years of urban growth*. New York.

- Chen, X.-L., Zhao, H.-M., Li, P.-X. and Yin, Z.-Y., 2006: Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment* 104, 133–146.
- Chiles, J.-P. and Delfiner, P., 1999: Geostatistics, Modeling Spatial uncertainty. Wiley Series in Probability and Statistics.
- Chow, S.D., Zheng, J. and Wu, L., 1994: Solar radiation and surface temperature in Shanghai City and their relation to urban heat island intensity. *Atmospheric Environment* 28, 2119–2127.
- Climatological Normals (CLINO) for the Period 1961–1990. WMO/OMM-No. 847 (1996)
- Cohen, J., Cohen, P., West, S.G., Aiken, L.S., 2003. Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences. (2nd ed.) Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates.
- Comrie, A.C., 2000: Mapping a wind-modified urban heat island in Tucson, Arizona (with comments on integrating research with undergraduate learning). *Bull. Am. Meteorological Society* 81, 2417–2431.
- Csató É., 2000: Műholdadatok térképészeti alkalmazása. ELTE doktori értekezés (kézirat), Szeged.
- Dezső, Zs., Bartholy, J. and Pongrácz, R., 2005: Satellite-based analysis of the urban heat island effect. *Időjárás* 109, 217–232.
- Dezső, Zs., Bartholy, J. and Pongrácz, R., 2006: Urban heat island analysis using MODIS measurements for Central European large cities. *Preprints 6th Int Conf on Urban Climate, Göteborg, Sweden*, 806–809.
- Dousset, B. and Gourmelon, F., 2003: Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing* 58, 43–54.
- Duckworth, F.S. and Sandberg, J.S., 1954: The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 35, 198–207.
- Eliasson, I., 1996: Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment* 30, 379–392.
- Emery, X., 2006: Multigaussian kriging for point-support estimation: incorporating constraints on the sum of the kriging weights. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 20, 53–65.
- ERDAS IMAGINE Stereo Analyst User's Guide, ERDAS Inc. Atlanta, 2000, 282 p.
- Fezer, F., 1995: Das Klima der Städte. Justus Perthes, Gotha.
- Fortuniak, K. and Klysiak, K., 1998: Intensity of the urban heat island in Lodz under winter conditions and its simple model. *Acta Univ Lodziensis, Folia Geographica Physica* 3, 83–90.
- Fortuniak, K., 2003: An application of the urban energy balance scheme for a statistical modeling of the UHI intensity. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klysiak, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz. Lodz, Poland. Vol. 1. 59–62.
- Frisnyák S., Futó, J., Göcz L., Kormány Gy., Moholi K., Páristáné Erdős M. és Süli-Zakar I., 1988: Magyarországi földrajza. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Fukui, E., 1970: The recent rise of temperature in Japan. *Jpn. Progress in Climatology* 46–65.
- Gál, T. and Sümeghy, Z., 2007: Mapping the roughness parameters in a large urban area for urban climate applications. *Acta Climatologica Univ. Szegediensis* 40–41, 27–36.
- Gál T., Balázs B. és Unger J., 2004: A városi hősziget területi szerkezetének és a város geometriáját jellemző főbb paraméterek kapcsolata. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek No. 19., ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest*, 153–157.
- Gál, T., Balázs, B. and Geiger, J., 2005a: Modelling the maximum development of urban heat island with the application of GIS based surface parameters in Szeged (Part 2): Stratified sampling and the statistical model. *Acta Climatologica Univ Szegediensis* 38–39, 59–69.
- Gál T., Balázs B., Geiger J., Sümeghy Z. és Unger J., 2005b: Az átlagos maximális városi hősziget intenzitás modellezése felszínparaméterek felhasználásával, Szegeden. *A környezettudomány elmélete és gyakorlata, Tudományos konferencia, Szeged*. CD
- Gál, T., Rzepa, M., Gromek, B. and Unger, J., 2007: Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment. *Acta Climatologica Univ. Szegediensis* 40–41, 17–26.
- Gallo, K.P. and Owen, T.W., 1999: Satellite-based adjustments for the urban heat island temperature bias. *J. Appl. Meteorol.* 38, 806–813.
- Giridharan, R., Lau, S.S.Y. and Ganesan, S., 2005: Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. *Energy and Buildings* 37, 964–971.
- Giridharan, R., Lau, S.S.Y., Ganesan, S. and Givoni, B., 2007: Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. *Building and Environment* 42, 3669–3684.

- Grimmond, C.S.B. and Oke, T.R., 1991: An evapotranspiration-interception model for urban areas. *Water Resources Research* 27, 1739–1755.
- Grimmond, C.S.B., Cleugh, H.A. and Oke, T.R., 1991: An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric Environment* 25B, 311–326.
- Goldreich, Y., 1970: Computation of the magnitude of Johannesburg's heat island. *Notos* 19, 95–106.
- Gonclaves, L.S., Gazzola, H.L. and Sad, E.A., 2003: A comprehensive approach of the sky view factor and building mass in an urban area of the city of Belo Horizonte, Brazil. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klyzik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz, Lodz, Poland. P.3.12.
- Gulyás Á., 2005: Differences in human comfort conditions within a complex urban environment: A case study. *Acta Climatologica Univ Szegediensis* 38–39, 71–84.
- Gulyás, Á., Lakatos, L., Sümeghy, Z. and Gál, T., 2003a: Spatial distribution of the phenological phases and urban heat island in the cases of two Hungarian cities. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klyzik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz, Lodz, Poland. Vol. 2. 39–42.
- Gulyás, Á., Unger, J., Balázs, B. and Matzarakis, A., 2003b: Analysis of the bioclimatic conditions within different surface structures in a medium-sized city (Szeged, Hungary). *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 36–37, 37–44.
- Gulyás, Á., Unger, J. and Matzarakis, A., 2003c: Analysis of the thermophysiological significant conditions within a medium-sized city with continental climate (Szeged, Hungary). *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klyzik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz, Lodz, Poland. Vol. 2. 43–46.
- Gulyás Á., Unger J. és Matzarakis, A., 2004: A városi környezet mikroklimatikus jellemzőinek bioklimatológiai szempontú elemzése Szeged példáján. *II. Magyar Földrajzi Konferencia, Szeged*, CD.
- Gulyás, Á., Unger, J. and Matzarakis, A., 2006: Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: modelling and measurements. *Building and Environment* 41, 1713–1722.
- Jantos L., 1967: Szeged bel- és külterületének hőmérsékleti viszonyai. JATE doktori értekezés (kézirat), Szeged.
- Jauregui, E., 1973: The urban climate of Mexico City. *Erdkunde* 27, 298–307.
- Jendritzky, G. and Nübler, W., 1981: A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. *Arch. Meteorol. Geoph. Biol. Ser.B.* 29, 313–326.
- Justyák J., 1994: *Debrecen éghajlata*. KLTE, Debrecen.
- Kakas M. és Marguca V., 2004: A Beregszászban kialakuló városi hősziget. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek* No. 19., ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 162–164.
- Kanda, M., 2006: Progress in the scale modeling of urban climate. *Theoretical and Applied Climatology* 84, 23–33.
- Kántor, N., Unger, J. and Gulyás, Á., 2007: Human bioclimatological evaluation with objective and subjective approaches on the thermal conditions of a square in the centre of Szeged. *Acta Climatologica Univ. Szegediensis* 40–41, 47–58.
- Károssy Cs. és Gyarmati Z., 1980: Városi hősziget kialakulása Szeged légterében. *JGYTFK Tud. Közl.*, 111–120.
- Katona T. és Lengyel I., 1999: *Statistikai ismerettár*. JATEPress, Szeged.
- Keveiné Bárány I., 1988: Talajföldrajzi vizsgálatok Szeged környékén. *Alföldi tanulmányok* 12, 25–34.
- Kircsi, A. and Szegedi, S., 2003a: Temperature profiles in Debrecen, Hungary. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klyzik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz, Lodz, Poland. Vol. 1. 79–82.
- Kircsi, A. and Szegedi, S., 2003b: The development of the urban heat island studied on temperature profiles in Debrecen. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 36–37, 63–69.
- Kircsi A. és Szegedi S., 2004: A városi hősziget kialakulásának és fejlődésének vizsgálata hőmérsékleti profilokon Debrecenben. *II. Magyar Földrajzi Konferencia, Szeged*, CD.
- Kiss, G., Makra, L., Mika, J., Borsos, E. and Motika, G., 2005: Temporal characteristics of air pollutant concentrations in Szeged, Hungary. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 38–39, 125–133.

- Klysik, K. and Fortuniak, K., 1999: Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland. *Atmospheric Environment* 33, 3885–3895.
- Kratzer, P.A., 1956: *Das Stadtklima*. F. Vieweg und Sohn, Braunschweig.
- Kristóf, G., Bányai, T. and Rácz, N., 2006a: Development of computational model for urban heat island convection using general purpose CFD solver. *Preprints 6th Int Conf on Urban Climate*, Göteborg, Sweden, 822–825.
- Kristóf, G., Rácz, N., Bányai, T., Gál, T., Unger, J. és Weidinger, T., 2006b: A városi hősziget által generált konvekció modellezése általános célú áramlástanai szoftverrel – példaként egy szegedi alkalmazással. 3. Magyar Földrajzi Konferencia, Budapest, CD.
- Kurländer I., 1879: Budapest meteorológiai viszonyai. In Gerlóczy Gy. és Dulácska G. (eds): *Budapest és környéke természetrajzi, orvosi és közművelődési leírása*.
- Kuttler, W., 1990: Stadtklima. In Busch, P. und Kuttler, W.: *Grundriss Allgemeine Geographie. Teil 1: Klimatologie*. Ferdinand Schöningh, Paderborn – München – Wien – Zürich, 69.
- Kuttler, W., 1998: Stadtklima. In Heyer, E. (Ed.): *Witterung und Klima*. Teubner, Stuttgart-Leipzig, 328–364.
- Kuttler, W., Barlag, A-B. and Rossmann, F., 1996: Study of the thermal structure of a town in a narrow valley. *Atmospheric Environment* 30, 365–378.
- Lajos, T., Szepesi, Zs., Goricsán, I., Rékert, T., Suda, J. and Balczó, M., 2003: Wind tunnel measurement and numerical simulation of dispersion of pollutants in urban environment. *Proceed Conf on Modelling Fluid Flow*, Budapest, 507–514.
- Lakatos, L. and Gulyás, Á., 2003: Connection between phenological phases and urban heat island in Debrecen and Szeged, Hungary. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 36–37, 79–83.
- Landsberg, H.E., 1981: *The Urban Climate*. Academic Press, New York – London – Toronto – Sydney – San Francisco.
- Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W., 1987: *Remote Sensing and Image Interpretation*. J. Wiley & Sons.
- Lindberg, F., 2007: Modelling the urban climate using a local governmental geo-database. *Meteorological Applications* 14, 263–273.
- Long, N., Mestayer, P.G. and Kergomard, C., 2003: Urban database analysis for mapping morphology and aerodynamic parameters: the case of St Jerom sub-urban area, in Marseille during ESCOMPTE. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klysik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz. Lodz, Poland. Vol. 2. 389–392.
- Lowry, W.P., 1977: Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. *J. of Applied Meteorology* 16, 129–135.
- Makra, L. and Pálfi, S., 2007: Intra-regional and long-range ragweed pollen transport over southern Hungary. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 40–41, 69–77.
- Makra, L., Horváth, Sz., Zempléni, A., Csizsar, V., Rózsa, K. and Motika, G., 2001: Air quality trends in Southern Hungary. *EURASAP Newsletter* 42, 2–13.
- Makra, L., Juhász, M., Borsos, E. and Béczi, R., 2003: Ragweed pollen concentration and its meteorological components in Szeged, Hungary. *EURASAP Newsletter* 51, 2–14.
- Makra L., Juhász M., Borsos E. és Béczi R., 2004: A parlagfű pollen koncentráció Szegeden és kapcsolata a meteorológiai elemekkel. *Légkör* 49/1, 22–28.
- Masson, V., 2006: Urban surface modeling and meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology* 84, 35–45.
- Matzarakis, A., Mayer, H. and Iziomon, M.G., 1999: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *Int. J. Biometeorology* 43, 76–84.
- Matzarakis, A. and Gulyás, Á., 2006: A contribution to the thermal bioclimate of Hungary – Mapping of the Physiologically Equivalent Temperature. In Kiss A., Mezősi G. és Sümegey Z. (szerk): *Táj, környezet és társadalom. Ünnepi tanulmányok Keveiné Bárány Ilona professzor asszony tiszteletére*. SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged, 479–488.
- Mayer, H., Holst, T., Rost, J., Imbery, F. and Toudert, F.A., 2004: Thermal comfort conditions in an E-W oriented street canyon in Freiburg (Germany) during the European summer heat wave 2003. *5th Conf. on Urban Environment, AMS Meeting, Vancouver, Canada*, J1.2.
- Mézes F., 1995: Kultúrák – városszerkezetek. HVG, 1995. szeptember 16., 72–73.
- Mezősi G., 1983: Szeged geomorfológiai vázlata. *Alföldi tanulmányok* 7, 59–74.
- Mikami, T., Ando, H., Morishima, W., Izumi, T. and Shioda, T., 2003: A new urban heat island monitoring system in Tokyo. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klysik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz. Lodz, Poland. Vol. 1. 103–106.

- Miklósi Cs., 1981: A városi hősziget vizsgálata Budapesten. *Léggör* 26, No. 3., 21–22.
- Mitchell, J.M., Jr., 1961: The temperature of cities. *Weatherwise* 14, 224–229.
- Molnár J., Kakas M. és Marguca V., 2006a: A beregszászi hősziget intenzitásának és térbeli szerkezetének vizsgálata. In Kiss A., Mezősi G. és Sümeghy Z. (szerk): *Táj, környezet és társadalom. Ünnepi tanulmányok Keveiné Bárány Ilona professzor asszony tiszteletére. SZTE Éghajlattani és Tájjöldrajzi Tanszék, Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged*, 509–518.
- Molnár J., Kakas M. és Marguca V., 2006b: A települési hősziget-intenzitás Kárpátalja alföldi részén. 3. *Magyar Földrajzi Konferencia, Budapest*, CD.
- Molnár J., 2007: A városi hősziget és annak kapcsolata a főbb felszínparaméterekkel Beregszász példáján. In Tóth T. és Bíróné Kircsi A. (eds): *Kedvező széllel Kunhegyestől Debrecenig. Tiszteletkötet Dr. Tar Károly 60. születésnapjára*. Debreceni Egyetem, Meteorológiai Tanszék, Debrecen, 225–233.
- Molnár K., 1998: Analysis of urban temperature difference (in the case of Budapest). *Proceed. of the 2nd European Conf. on Appl. Climatol. (ECAC)*. Vienna, Austria, CD.
- Moreno-Garcia, M.C., 1994: Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *Int. J. Climatology* 14, 705–710.
- Morris, C.J.G., Simmonds, I. and Plummer, N., 2001: Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *J. Applied Meteorology* 40, 169–182.
- Mucsics L., 2004: *Műholdas távérzékelés*. Libellus, Szeged.
- Neumann, J., 1979: Air pollution in Ancient Rome. *Bull. Am. Meteorological Society* 60, 1097.
- Nikolopoulou, M. and Lykoudis, S., 2006: Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries. *Building and Environment* 41, 1455–1470.
- Nkemdirim, L.C. and Truch, P., 1978: Variability of temperature fields in Calgary, Alberta. *Atmospheric Environment* 12, 809–822.
- Oke, T.R., 1973: City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7, 769–779.
- Oke, T.R., 1974: Review of urban climatology 1968–73. *WMO Tech. Note* 134.
- Oke, T.R., 1976: The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere* 14, 268–277.
- Oke, T.R., 1979: Review of urban climatology. *WMO Tech. Note* 169.
- Oke, T.R., 1981: Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *J. Climatol.* 1, 237–254.
- Oke, T.R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. Royal Meteorological Society* 108, 1–24.
- Oke, T.R., 1984: Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. *Energy and Buildings* 7, 1–10.
- Oke, T.R., 1987: *Boundary layer climates*. Routledge, London – New York.
- Oke, T.R., 1988: The urban energy balance. *Progress in Physical Geography* 12, 471–508.
- Oke, T.R., 1997: Urban climates and global environmental change. In Thompson, R.D. and Perry, A. (eds): *Applied climatology*. Routledge, London-New York, 273–287.
- Oke, T.R. and Fuggle, R.F., 1972: Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. *Boundary Layer Meteorology* 2, 290–308.
- Oke, T.R. and Hannell F.G., 1970: The form of the urban heat island in Hamilton, Canada. In *Urban climates, WMO Tech. Note* 108, 113–126.
- Oke, T.R. and Maxwell, G.B., 1975: Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment* 9, 191–200.
- Park, H-S., 1986: Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities. *Atmospheric Environment* 20, 1859–1866.
- Park, H-S., 1987: Variations in the urban heat island intensity affected by geographical environments. *Environmental Research Center Papers* 11, The University of Tsukuba, Ibaraki, Japan, 1–79.
- Péczely Gy., 1979: *Éghajlattan*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Péczely Gy., 1984: *A Föld éghajlata*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Pelle L., 1983: Városlíma mérések Szegeden, *Léggör* 28, No. 1., 10–12.
- Peterson, J.T. and Stoffel, T.L., 1980: Analysis of urban-rural solar radiation data from St. Louis, Missouri. *J. Applied Meteorology* 19, 275–283.
- Pongrácz R., Bartholy J. és Dezső Zs., 2006a: A városi hősziget hatás elemzése közép-európai nagyvárosokra műholdas mérések alapján. 3. *Magyar Földrajzi Konferencia, Budapest*, CD.
- Pongrácz, R., Bartholy, J. and Dezső, Zs., 2006b: Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research* 37, 2191–2196.
- Prinz Gy., 1913: *Budapest földrajza*. Magyar Földrajzi Intézet, Budapest.
- Probáld F., 1974: *Budapest városlímája*. Akadémiai Kiadó, Budapest.

- Probáld F., 1975: A városklimatológia időszerű feladatai. *Időjárás* 79, 69–76.
- Probáld F., 1976: The role of green areas in planning the atmospheric environment of cities. *Ann. Univ. Scientiarum Budapestinensis de Rolando Eötvös Nominata, Sectio Geographica* 12, 141–159.
- Probáld F., 1980: A felszínközei áramlási mező típusai Budapesten. *Földrajzi Értesítő* 29, 171–192.
- Ratti, C., Di Sabatino, S. and Bitter, R., 2006: Urban texture analysis with image processing techniques: wind and dispersion. *Theoretical and Applied Climatology* 84, 77–99.
- Réthy A., 1947: *Budapest éghajlata*. Rheuma- és Fürdőkutató Intézet, Budapest.
- Ripley, E.A., Archibold, O.W. and Bretell, D.L., 1996: Temporal and spatial temperature patterns in Saskatoon. *Weather* 51, 398–405.
- Ronczi B., 1985: Városklíma mérések Egerben. *Léggör* 30, No. 3., 31–33.
- Roulet, Y.-A., 2003: Modelling of urban effects over the city of Basel (Switzerland) as a part of the BUBBLE project. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klysik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. *International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz, Lodz, Poland. Vol. 1.* 369–372.
- Sándor V. és Baranka Gy., 1993: Nagyvárosi légszennyezettség – Budapesti helyzetkép. *Léggör* 38, No. 4., 6–10.
- Santos, I.G., Lima, H.G. and Assis, E.S., 2003: A comprehensive approach of the sky view factor and building mass in an urban area of city of Belo Horizonte, Brazil. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klysik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. *International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz, Lodz, Poland. Vol. 2.* 367–370.
- Sárközy, F., 2008: Térinformatika. http://www.agt.bme.hu/tutor_h/terinfor/tbev.htm
- Souza, L.C.L., Rodrigues, D.S. and Mendes, J.F.G., 2003: The 3D SkyView extension: an urban geometry access tool in a geographical information system. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klysik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. *International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz, Lodz, Poland. Vol. 2.* 413–416.
- Sindely P., 1978: *A hőmérséklet és légnedvesség különbségek alakulása Szeged város és környezete között*. JATE doktori értekezés (kézirat), Szeged.
- Stathopoulou, M., Cartalis, C., and Keramitsoglou, I., 2004: Mapping micro-urban heat islands using NOAA/AVHRR images and CORINE Land Cover: an application to coastal cities of Greece. *Int. J. Remote Sensing* 25, 2301–2316.
- Stewart, I.D., 2000: Influence of meteorological conditions on the intensity and form of the urban heat island effect in Regina. *The Canadian Geographer* 44, 271–285.
- Stummer, G., 1939: Klimatische Untersuchungen in Frankfurt am Main und seinen Vororten. *Ber. Meteorol. Geophys. Inst., Univ. Frankfurt*, 5.
- Sundborg, Å., 1950: Local climatological studies of the temperature conditions in an urban area. *Tellus* 2, 222–232.
- Sundborg, Å., 1951: Climatological studies in Uppsala with special regard to the temperature conditions in the urban area. *Geographica (Geographical Institute, University of Uppsala)* 22, 1–111.
- Sümethy, Z. and Unger, J., 2003a: Classification of the urban heat island patterns. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 36–37, 93–100.
- Sümethy, Z. and Unger, J., 2003b: Seasonal case studies on the urban temperature cross-section. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 36–37, 101–109.
- Sümethy Z. és Unger J., 2004a: A városi hősziget szerkezetének vizsgálata normalizált intenzitás segítségével. *Léggör* 49/2, 15–19.
- Sümethy Z. és Unger J., 2004b: Az épített környezet léghőmérséklet-módosító hatása. *Építész spektrum* 3/6, 14–17.
- Sümethy Z. és Unger J., 2006: A relatív légnedvesség vizsgálata reprezentatív városi keresztmetszet mentén, Szegeden. 3. *Magyar Földrajzi Konferencia, Budapest*, CD.
- Sümethy, Z., Unger, J., Balázs, B. and Zboray, Z., 2003: Seasonal patterns of the urban heat island. In Klysik K, Oke TR, Fortuniak K, Grimmond CSB and Wibig J (eds): *Proceed Fifth Int Conf on Urban Climate Vol. 1. University of Lodz, Lodz, Poland*, 135–138.
- Sümethy Z., Balázs B., Botlyán Zs. és Unger J., 2004a: A városi hősziget statisztikai modellezése felszínparaméterek felhasználásával. In Kovács-Pálffy P et al (eds): *Délvidéki tájakon. GEO 2004. Magyar Földtudományi Szakemberek VII. Világtalálkozója, Szeged*, D2
- Sümethy Z., Gál T. és Unger J., 2004b: A városi hősziget területi szerkezetének osztályozási típusai és helyes interpretációja. In Kovács-Pálffy P et al (eds): *Délvidéki tájakon. GEO 2004. Magyar Földtudományi Szakemberek VII. Világtalálkozója, Szeged*, D24

- Sümeghy Z., Berta A., Gulyás Á. és Kiss A., 2006a: A relatív légnedvesség városi keresztmetszet menti éjszakai eloszlásának vizsgálata esettanulmányok segítségével, Szegeden. In Kiss A, Mezősi G és Sümeghy Z (szerk): *Táj, környezet és társadalom. Ünnepi tanulmányok Keveiné Bárány Ilona professzor asszony tiszteletére. SZTE Éghajlattani és Tájjöldrajzi Tanszék, Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged*, 619–631.
- Sümeghy, Z., Unger, J., Balázs, B. and Gál, T., 2006b: Air humidity distribution along a representative urban cross-section in Szeged, Hungary. *Preprints 6th Int Conf on Urban Climate, Göteborg, Sweden*, 863–866.
- Svensson, M., Eliasson, I. and Holmer, B., 2002: A GIS based empirical model to simulate air temperature variations in the Göteborg urban area during the time. *Climate Research* 22, 215–226.
- Szegedi S., 2005: Települési hősziget-mérések jellegzetes méretű alföldi településeken. *Debreceni Földrajzi Disputa (Disputatio Geographica Debrecina)*, 157–180.
- Szegedi, S., 2006: Heat islands in small and medium-sized towns in Hungary. *Preprints 6th Int Conf on Urban Climate, Göteborg, Sweden*, 439–442.
- Szegedi S. és Baros Z., 2006: A hősziget kifejlődése és a település méret közötti kapcsolatok vizsgálata hajdúsági településeken. In Kiss A, Mezősi G. és Sümeghy Z. (szerk): *Táj, környezet és társadalom. Ünnepi tanulmányok Keveiné Bárány Ilona professzor asszony tiszteletére. SZTE Éghajlattani és Tájjöldrajzi Tanszék, Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged*, 657–665.
- Szegedi, S. and Kircsi, A., 2003a: The development of the urban heat island under various weather conditions in Debrecen, Hungary. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klysik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. *International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz. Lodz, Poland. Vol. 1.* 139–142.
- Szegedi, S. and Kircsi, A., 2003b: Effects of the synoptic conditions in the development of the urban heat island in Debrecen, Hungary. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 36–37, 111–120.
- Szegedi S. és Kircsi A., 2004: A városi hősziget kialakulása és térszerkezete különböző időjárási helyzetekben. *II. Magyar Földrajzi Konferencia, Szeged*, CD.
- Szymanowski, M., 2003: Spatial structure of the urban heat island in Wrocław, Poland. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klysik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. *International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz. Lodz, Poland. Vol. 1.* 151–154.
- Terjung, W. H. and O'Rourke, P. A., 1980: Simulating the casual elements of urban heat islands. *Boundary Layer Meteorology* 19, 93–118.
- Thielen, J. and Troude, F., 2000: Representation of the urban atmospheric boundary layer in mesoscale models. *ERCA Vol 4*. 101–123.
- UN, 2008: *World urbanization prospects. The 2007 revisions*. United Nations.
- Unger, J., 1992a: The seasonal system of urban temperature surplus in Szeged, Hungary. *Acta Climatologica Univ. Szegediensis* 24–26, 49–57.
- Unger, J., 1992b: Diurnal and annual variation of the urban temperature surplus in Szeged, Hungary. *Időjárás* 96, 235–244.
- Unger, J., 1993: The urban influence on the diurnal and annual patterns of absolute humidity in Szeged, Hungary. *Acta Climatologica Univ. Szegediensis* 27, 33–39.
- Unger J., 1995: Szeged városklímájának bioklimatológiai értékelése. *Légekör* 40, No. 3., 29–33.
- Unger, J., 1996a: Heat island intensity with different meteorological conditions in a medium-sized town: Szeged, Hungary. *Theoretical and Applied Climatology* 54, 147–151.
- Unger J., 1996b: A városi hősziget és a szél kapcsolata Szeged példáján. *Légekör* 41, No. 4., 21–23.
- Unger J., 1997a: Városklimatológia – Szeged városklímája. *Acta Climatologica Univ. Szegediensis* 31/B.
- Unger J., 1997b: *Lokális és mikroklímák*. SZTE TTK jegyzet, Éghajlattani és Tájjöldrajzi Tanszék, Szeged.
- Unger J., 1997c: A városi hősziget hatása a fűtési energiaigényre Szegeden. *Légekör* 42, No. 2., 18–19.
- Unger, J., 1997d: Some features of the development of an urban heat island. *Studia Universitatis Babe-Bolyai, Geographia* 42, 125–131.
- Unger, J., 1998: Urban influence on human comfort (on the example of Szeged). *Acta Univ. Lodziensis, Folia Geographica Physica* 3, 539–546.
- Unger, J., 1999a: Urban-rural air humidity differences in Szeged, Hungary. *Int. J. Climatology* 19, 1509–1515.
- Unger, J., 1999b: Comparisons of urban and rural bioclimatological conditions in the case of a Central-European city. *Int. J. Biometeorology* 43, 139–144.
- Unger, J., 2004: Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. *Climate Research* 27, 253–264.

- Unger, J., 2006: Modelling of the annual mean maximum urban heat island with the application of 2 and 3D surface parameters. *Climate Research* 30, 215–226.
- Unger, J. and Makra, L., 2007: Urban-rural difference in the heating demand as a consequence of the heat island. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 40–41, 155–162.
- Unger J. és Sümeghy Z., 2002: *Környezeti klimatológia. Kisléptékű éghajlatok, városklíma*. SZTE TTK jegyzet, JATEPress, Szeged.
- Unger J. és Sümeghy Z., 2005: A városi környezet hatására fellépő lokális és mikroklimatikus léptékű módosulások. "AGRO-21" Füzetek, *Klímaváltozás – Hatások – Válaszok* 44, 45–56.
- Unger J., Pál V., Sümeghy Z., Kádár E. és Kovács L., 1999: A maximális kifejlődésű városi hősziget területi kiterjedése tavasszal Szegeden. *Léggör* 44, No. 3., 34–37.
- Unger, J., Bottyán, Z., Sümeghy, Z. and Gulyás, Á., 2000: Urban heat island development affected by urban surface factors. *Időjárás* 104, 253–268.
- Unger, J., Sümeghy, Z., Gulyás, Á., Bottyán, Z. and Mucsi, L., 2001a: Land-use and meteorological aspects of the urban heat island. *Meteorological Applications* 8, 189–194.
- Unger, J., Sümeghy, Z., Mucsi, L., Pál, V., Kádár, E. and Kevei-Bárány, I., 2001b: Urban temperature excess as a function of urban parameters in Szeged, Part 1: Seasonal patterns. *Acta Climatologica Univ. Szegediensis* 34–35, 5–14.
- Unger, J., Sümeghy, Z. and Zoboki, J., 2001c: Temperature cross-section features in an urban area. *Atmospheric Research* 58, 117–127.
- Unger, J., Bottyán, Z., Kovács, P., Balázs, B. and Géczi, R., 2003: A statistical model for estimating mean maximum urban heat island. In Klysik K, Oke TR, Fortuniak K, Grimmond CSB and Wibig J (eds): *Proceed Fifth Int Conf on Urban Climate Vol. 1. University of Lodz, Lodz, Poland*, 155–158.
- Unger, J., Bottyán, Z., Sümeghy, Z. and Gulyás, Á., 2004: Connection between urban heat island and surface parameters: measurements and modeling. *Időjárás* 108, 173–194.
- Unger J., Gulyás Á. és Matzarakis, A., 2005: Eltérő belvárosi mikrokörnyezetek hatása a humán bioklimatikus komfortérzetre. *Léggör* 50/1, 9–14.
- Unger, J., Balázs, B., Sümeghy, Z. and Gál, T., 2006a: Multiple variable model for estimating the maximum UHI using 2 and 3 dimensional surface parameters. *Preprints 6th Int Conf on Urban Climate, Göteborg, Sweden*, 334–337.
- Unger J., Gál T., Balázs B. és Sümeghy Z., 2006b: A városi felszíngeometria és a hőmérséklet területi eloszlása közötti kapcsolat Szegeden. In Kiss A, Mezősi G és Sümeghy Z (szerk): *Táj, környezet és társadalom. Ünnepi tanulmányok Keveiné Bárány Ilona professzor asszony tiszteletére. SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged*, 735–746.
- Unger J., Gál T., Balázs B. és Sümeghy Z., 2006c: A városi felszín összetett geometriájának hatása a városi hőszigetre Szegeden. *3. Magyar Földrajzi Konf, Budapest*, CD.
- Unger, J., Gál, T., Balázs, B. and Sümeghy Z., 2006d: Relationship between the intra-urban variation of sky view factor approximated by a software based tool and air temperature. *Preprints 6th Int Conf on Urban Climate, Göteborg, Sweden*, 346–349.
- Unger, J., Sümeghy, Z., Gál, T. and Balázs, B., 2006e: Statistical modelling of the urban heat island using 2 and 2D surface parameters in Szeged, Hungary. *Volume of Abstracts. 8th Conf on Meteorology-Climatology-Atmospheric Physics, Athens*, 169.
- Voogt, J.A. and Oke, T.R., 1991: Validation of an urban canyon radiation model for nocturnal long-wave radiative fluxes. *Boundary Layer Meteorology* 54, 347–361.
- Voogt, J.A. and Oke, T.R., 1997: Complete urban surface temperatures. *J. Applied Meteorology* 36, 1117–1132.
- Yamashita, S., 1996: Detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric tram-cars in metropolitan Tokyo. *Atmospheric Environment* 30, 429–435.
- Zsiga A., 1983: A városmorfológiai típusok és a városi hőmérséklet összefüggései Szegeden. *JGYTFK Tud. Közleményei*, 95–102.
- Zsiga A., 1988: Szeged beépítettségének városklimatológiai vonatkozásai. *JGYTFK Tud. Közleményei*, 79–97.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Mindenekelőtt témavezetőmnek, Dr. Unger János docensnek szeretnék köszönetet mondani, hiszen dolgozatom megírásához az ő szakmai segítsége, precizitása nélkülözhetetlen volt. Munkám az általa létrehozott szegedi „városklíma műhely” bő másfél évtizedes tevékenységének és eredményeinek szerves részét képezi.

Hálával tartozom a hasznos szakmai tanácsokért és megjegyzésekért Dr. Sümeghy Zoltán adjunktusnak (SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék), Dr. Geiger János docensnek (SZTE Földtani és Őslénytani Tanszék), Dr. Mucsi László docensnek (SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék), Bottyán Zsolt meteorológus főtitárnak (86. Szolnok Helikopter Bázis), Zboray Zoltán kiértékelő mérnöknek (HM Térképészeti Kht., Fotogrammetriai Alosztály), Székely László tudományos segédmunkatárának (SZTE Bolyai Intézet), valamint Gál Tamás PhD-hallgatónak (SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék).

Köszönöm továbbá prof. Dr. Keveiné Dr. Bárány Ilona korábbi tanszékvezetőnek (SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék) a munkám során tanúsított bizalmat és a támogatást, valamint a SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék dolgozóinak, barátaimnak a segítségét, itt külön kiemelném Tanács Eszter korábbi PhD-hallgatót, aki mindig gondosan lektorálta az angol nyelvű írásaimat.

Végezetül, de nem utolsó sorban, végtelen hálával tartozom szüleimnek, páromnak, családomnak és barátaimnak, akiknek támogatására mindig számíthattam a célom eléréséhez.